



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۵۳۸-۲۵۲۹)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.326215.669006>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Evaluation of Three Indirect Methods in Estimating Soil Water Characteristic Curve

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: June. 26, 2021- Revised: July. 25, 2021- Accepted: Sep. 18, 2021)

ABSTRACT

In the present study, three methods of the inverse numerical solution, transfer function, and artificial neural network for estimating soil hydraulic parameters were evaluated. A Double-ring infiltration experiment was conducted in three sites with different soil textures with three replications. Disturbed and undisturbed soil samples were also collected from three depths (0–10, 10–30, and 30–60 cm) for each soil, and some soil physical properties were measured. In this study, HYDRUS- 2D/3D software was used for inverse estimating of hydraulic parameters. The accuracy and reliability of the predictions were evaluated by the mean difference (MSD, $m^3 m^{-3}$), the value of mean differences (MD, $m^3 m^{-3}$), the mean and the standard deviation of the root of mean squared differences (RMSD, $m^3 m^{-3}$) and the Pearson's correlation coefficient (r). The results showed that inverse estimation of soil hydraulic parameters provided a reliable alternative method for determining the soil water retention curve at the field scale. The soil water retention curves obtained from the RETC fitting had very good correspondence with those derived from inverse modeling. The highest value of determination coefficient (R^2) was observed between the measured and estimated volumetric moisture in the inverse numerical solution method ($R^2 = 0.9363$). After that, the estimated volumetric moisture with Rosetta software ($R^2 = 0.8629$) and the PTF of Dashtaki and Homayi ($R^2 = 0.8401$) were respectively.

Keywords: Artificial Neural Networks, Inverse Modeling, Pedo Transfer Functions, Soil Hydraulic Properties.

بررسی سه روش غیر مستقیم در برآورد منحنی مشخصه رطوبتی 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: ۱۴۰۰/۴/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۳ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۶/۲۷)

چکیده

در پژوهش حاضر سه روش حل عددی معکوس، تابع انتقالی و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، آزمایش نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های دوگانه در سه منطقه از استان اصفهان با بافت‌های مختلف خاک انجام شد. در هر منطقه نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده خاک از سه عمق (۱۰-۰، ۳۰-۳۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر برداشت شده و ویژگی‌های مختلف فیزیکی و هیدرولیکی خاک در این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی به روش معکوس از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D استفاده شد. برای ارزیابی روش‌های مذکور از شاخص‌های ضریب همبستگی پیرسون (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSD)، اختلاف میانگین‌ها (MSD) و قدر مطلق خطای میانگین‌ها (MD) استفاده شد. نتایج نشان داد که روش حل معکوس یک روش قابل اعتماد برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک در مقیاس میدانی است. بر اساس ارزیابی‌های آماری صورت گرفته، منحنی مشخصه رطوبتی برآوردشده به روش حل معکوس با منحنی مشخصه رطوبتی به دست آمده از طریق برازش مدل ونگنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده، همخوانی بسیار خوبی داشت. بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2) بین میزان رطوبت حجمی اندازه‌گیری و برآورد شده در روش حل عددی معکوس مشاهده شد ($R^2 = 0.9363$) و بعد از آن به ترتیب رطوبت حجمی برآوردشده با نرم افزار Rosetta ($R^2 = 0.8629$) و تابع انتقالی قربانی دشتکی و همایی ($R^2 = 0.8401$) قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی خاک، توابع انتقالی، شبکه عصبی، مدلسازی معکوس.

مقدمه

اندازه‌گیری این ویژگی‌ها، مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر چند این روش‌ها دارای اصول و مفاهیم واضح و روشنی هستند، اما استفاده از آنها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. از طرفی، در بیشتر روش‌های آزمایشگاهی از نمونه‌های کوچک به حجم 100 تا 500 سانتیمتر مکعب استفاده می‌شود (Ethan & Eric, 2007) بنابراین استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده در این مقیاس هر چند هم که دقیق صورت گرفته باشد، به سختی برای مقیاس‌های بزرگ مزرعه‌ای قابل تعمیم است (Schelle *et al.*, 2012). افزون بر این، به‌علت تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (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)؛ بنابر دلایلی که گفته شد، پژوهشگران برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، به سمت روش‌های غیرمستقیم روی آوردند. از جمله این روش‌ها می‌توان

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با تاثیر بر حرکت آب در خاک، نقش مهمی در چرخه آب و انرژی ایفا می‌کنند. آگاهی از این ویژگی‌ها برای پیش‌بینی حرکت آب و املاح در خاک، مسائل مختلف آبیاری و زهکشی، تعیین نیاز آبی گیاهان، مقدار آب موجود در خاک، کنترل شوری و مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری اهمیت زیادی دارد (Alletto *et al.*, 2015). دقت برآورد و مدل‌سازی جریان آب و املاح در خاک به دقت در برآورد ویژگی‌ها و یا پارامترهای هیدرولیکی خاک بستگی دارد (Scharnagl *et al.*, 2011). منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع از جمله مهمترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در بررسی حرکت آب در خاک به شمار می‌آیند که هم در رابطه با مدیریت آب و خاک و هم درباره سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند رطوبت قابل استفاده، تخلخل خاک و توزیع اندازه منافذ، اطلاعات سودمندی ارائه می‌کنند (Bahrami & Aghamir, 2020). معمول‌ترین روش تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، روش مستقیم اندازه‌گیری آنها در آزمایشگاه است. تاکنون روش‌های مستقیم زیادی برای

به استفاده از توابع انتقالی (PTFs) رگرسیونی خطی و غیرخطی (Dobarco *et al.*, 2019; Gunarathna *et al.*, 2019; Rastgou Charles *et al.*, 2020)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) (Charles *et al.*, 2020; 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 دیریافت خاک مانند منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی و پارامترهای زودیافت 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 رگرسیون‌گیری مانند نرمال بودن توزیع خطاها حول میانگین نیز از دیگر محدودیت‌های کاربرد این توابع است. افزون بر این، تخمین پارامترها در سری‌های کوچک داده‌های تجربی با تعداد محدود نمونه خاک توام با خطا می‌باشد (Nemes *et al.*, 2008). 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 انجام‌شده، ANNs را توانمندتر از روش‌های رگرسیونی دانسته‌اند؛ با این وجود این مدل‌ها 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 (Baker and Ellison, 2008).

روش حل معکوس (Inverse solution) فرآیندی است که در آن به‌طور متوالی پارامترها به طریقی تعدیل و تنظیم می‌شوند که مدل با دقت مناسب و قابل قبولی قادر به تخمین پاسخ سیستم مورد بررسی در دوره زمانی مشخص باشد. در این روش، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از طریق حل عددی مکرر معادلات جریان، به‌صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند (Vrugt *et al.*, 2008).

استفاده از روش‌های مدل‌سازی معکوس در چند سال گذشته بسیار افزایش یافته است (Naik *et al.*, 2018) و (da Silva Junior *et al.*, 2020). پیشرفت در مدل‌های عددی و قدرت محاسباتی رایانه‌های موجود، اجازه حل معکوس مسایل مربوط به جریان‌های اشباع و غیراشباع در خاک را می‌دهد. نتایج پژوهش‌ها، کارایی زیاد این روش را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در آزمایش‌های مختلف جریان‌های ورودی و خروجی از ستون خاک، در شرایط آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهند (mashayekhi *et al.*, 2017). روش معکوس در مقایسه با سایر روش‌ها، ارزان و سریع است. در این روش، ویژگی‌های خاک بر پایه متغیرهای زودیافت در شرایط واقعی برآورد می‌شوند. از دیگر برتری‌های این روش، آن است که برخلاف روش‌های دیگر، پارامترهای موثر (Effective parameters) را تخمین می‌زند و توانایی برآورد همزمان ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح را دارد (Schlager *et al.*, 2020). بنابراین اثرات متقابل پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح بر ویژگی‌هایی از خاک که قرار است به روش معکوس تعیین شوند، در نظر گرفته می‌شود. (Abbasi and Tajic, 2007) از داده‌های مربوط به رطوبت اندازه‌گیری شده در آبیاری جویچه‌ای برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس استفاده نمودند. در این پژوهش پارامترهای هیدرولیکی خاک و همچنین پارامترهای مربوط به انتقال املاح با دقت قابل قبولی به صورت همزمان برآورد شدند. در روش معکوس، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در تمام محدوده رطوبتی برآورد شده و نیازی به اعمال تغییرات در معادله‌های حاکم بر پدیده نیست. افزون بر این در روش یادشده، دانسته‌هایی در مورد عدم اطمینان (Uncertainty) و همبستگی (Correlation) بین پارامترها ارائه می‌شود (Kirkham *et al.*, 2019). (Gribb *et al.*, 2008) و (Vereecken *et al.*, 2010) دریافتند که ویژگی‌های هیدرولیکی که به‌صورت معکوس از طریق اندازه‌گیری‌های درجا شامل میزان اندازه‌گیری رطوبت خاک و یا پتانسیل ماتریک در شرایط طبیعی و واقعی برآورد می‌شوند، بسیار بهتر از اندازه‌گیری‌های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی و توابع انتقالی، شرایط جریان آب در خاک را توصیف می‌کنند. 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). در نرم‌افزار Rosetta برای

به استفاده از توابع انتقالی (PTFs) رگرسیونی خطی و غیرخطی (Dobarco *et al.*, 2019; Gunarathna *et al.*, 2019; Rastgou Charles *et al.*, 2020)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) (Charles *et al.*, 2020; 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 دیریافت خاک مانند منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی و پارامترهای زودیافت 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 رگرسیون‌گیری مانند نرمال بودن توزیع خطاها حول میانگین نیز از دیگر محدودیت‌های کاربرد این توابع است. افزون بر این، تخمین پارامترها در سری‌های کوچک داده‌های تجربی با تعداد محدود نمونه خاک توام با خطا می‌باشد (Nemes *et al.*, 2008). 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 انجام‌شده، ANNs را توانمندتر از روش‌های رگرسیونی دانسته‌اند؛ با این وجود این مدل‌ها 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 (Baker and Ellison, 2008).

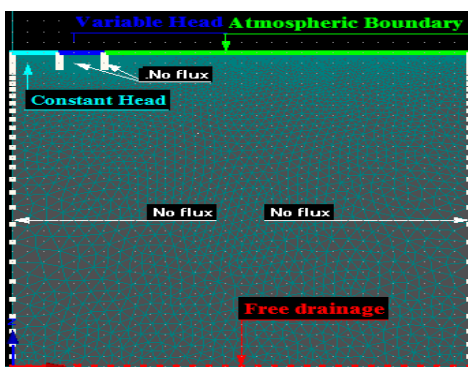
روش حل معکوس (Inverse solution) فرآیندی است که در آن به‌طور متوالی پارامترها به طریقی تعدیل و تنظیم می‌شوند که مدل با دقت مناسب و قابل قبولی قادر به تخمین پاسخ سیستم مورد بررسی در دوره زمانی مشخص باشد. در این روش، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از طریق حل عددی مکرر معادلات جریان، به‌صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند (Vrugt *et al.*, 2008).

اشباع به روش بار ثابت با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده که توسط سیلندرهای نمونه‌برداری، با همان مشخصات فوق، برداشت شدند، 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، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) به کمک دستگاه صفحه فشار اندازه‌گیری شد (Klute, 1986). پارامترهای معادله ون‌گنوختن با استفاده از نقاط منحنی مشخصه رطوبتی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، به کمک نرم افزار RETC در هر نمونه خاک برآورد شدند.

پایاده‌سازی شرایط آزمایش نفوذ آب به خاک در محیط نرم-

افزار HYDRUS-2D/3D

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 سانتی‌متر 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).



شکل ۱- شرایط مرزی تعریف‌شده برای شبیه‌سازی آزمایش نفوذ از طریق استوانه‌های-دوگانه به‌وسیله مدل HYDRUS-2D/3D

در نرم‌افزار HYDRUS برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک از معادله ریچاردز استفاده می‌شود. بر این اساس، از مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون‌گنوختن و مدل هدایت هیدرولیکی ون‌گنوختن- معلم (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) با

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 ظرفیت زراعی خاک (FC)، میزان رطوبت در نقطه پژمردگی گیاه (PWP). در پژوهش انجام گرفته توسط Ebrahimi and Raouf (2015) استفاده از بین سطوح مختلف ورودی در Rosetta، سطح ورودی بافت بعلاوه چگالی ظاهری بیشترین دقت در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را داشت. در این پژوهش پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از تابع انتقالی قربانی دشتکی و همایی (Ghorbani Dashtaki et al., 2010) برآورد شدند. بر اساس اکثر پژوهش‌های انجام شده بر روی خاک‌های کشور، این تابع انتقالی از دقت قابل قبولی در برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی، برخوردار بوده است (Fooladmand, 2011 و Jafari Gilandeh et al., 2013). در نهایت پارامترهای هیدرولیکی خاک برآورد شده به کمک نرم‌افزار Rosetta، روش حل معکوس و تابع انتقالی، مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌های صحرائی و آزمایشگاهی

برای انجام این پژوهش، آزمایش نفوذ آب به خاک با استفاده از نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه در ۳ منطقه مختلف (در استان اصفهان) با ۳ نوع بافت متفاوت خاک 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 ۱۰-۳۰، ۰-۱۰ و ۳۰-۶۰ 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 and 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)، درصد اشباع به روش وزنی و هدایت هیدرولیکی

مربعات انحرافها (RMSD) (m^3m^{-3})، اختلاف میانگینها (MD) (m^3m^{-3})، میانگین مربعات انحرافها (MSD) (m^3m^{-3}) استفاده شد. روابط ۸ تا ۱۱ مربوط به معیارهای آماری مورد استفاده است (Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2010). در این رابطهها $\theta(h)$ mi رطوبت اندازه‌گیری شده در یک مکش مشخص $\theta(h)pi$ رطوبت برآورد شده برای همان مکش مشخص می‌باشد. همچنین $k = 1, 2, \dots$ که تعداد کل خاک‌های مورد مطالعه است. ضرایب a و b به ترتیب حدود بالا و پایین فشار اعمال شده بر روی نمونه‌های خاک برای ایجاد منحنی نگهداشت آب در خاک است. (رابطه ۸)

$$r = \frac{\int_a^b (\theta(h)mi - \bar{\theta} mi) \cdot (\theta(h)pi - \bar{\theta} pi) dh}{\sqrt{\int_a^b (\theta(h)mi - \bar{\theta} mi)^2 dpF \cdot \int_a^b (\theta(h)pi - \bar{\theta} pi)^2 dh}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$MD = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)pi - \theta(h)mi) dh \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$MSD = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)pi - \theta(h)mi)^2 dh \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$RMSD = \sqrt{MSD}$$

همچنین $\bar{\theta} mi$ میانگین میزان آب در داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی اندازه‌گیری شده در دامنه فشار اعمال شده ($a-b$) و $\bar{\theta} pi$ میانگین میزان آب در داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی شبیه‌سازی شده در همان دامنه است که از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند:

$$\bar{\theta} mi = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)mi) dh \quad (۱۲)$$

$$\bar{\theta} pi = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)pi) dh \quad (۱۳)$$

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس درصد ذرات اولیه خاک تعیین شده (با استفاده از سیستم طبقه‌بندی اندازه ذرات وزارت کشاورزی آمریکا)، خاک‌های مورد مطالعه در سه کلاس متفاوت شامل رس سیلنتی Silty Clay (بافت ریز)، لوم Loam (بافت متوسط) و لوم شنی Sandy Loam (بافت درشت) قرار گرفتند. در جدول زیر Ks : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_s : رطوبت اشباع خاک، FC: رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر و PWP: رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش ۱۵۰۰ سانتی‌متر است.

فرض $m=1-1/n$ که به ترتیب به شکل زیر هستند، برای کمی نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز (Richards, 1931) استفاده شد:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{(1-1/n)}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$K(S_e) = K_{s0} S_e^l [1 + (1 - S_e^{1/(1-1/n)})^{(1-1/n)}]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه θ_r رطوبت باقی مانده ($cm^3 cm^{-3}$)، θ_s رطوبت اشباع ($cm^3 cm^{-3}$)، α پارامتری مرتبط با عکس مکش ماتریک در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (cm^{-1})، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی (-)، S_e درجه اشباع موثر، Ks 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. همچنین شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، بر اساس پتانسیل ماتریک تعریف شد؛ بدین ترتیب که به دلیل خشک بودن خاک (با توجه به رطوبت اولیه اندازه‌گیری شده در خاک)، پتانسیل ماتریک برابر با ۱۰۰۰۰- سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

تابع انتقالی قربانی دشتکی و همایی (Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2010)

در این تابع از متغیرهای چگالی ظاهری (Bd)، میانگین هندسی (σ_g) و انحراف معیار هندسی (d_g) قطر ذرات خاک برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی، استفاده شده است:

$$\theta_r = 0.22 - 0.521d_g^* \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\theta_s = 0.891 - 0.285Bd - 0.131d_g^* \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$a = (-404 - 632d_g^* + 528Bd - 8.79\sigma_g)^{-1} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$n = 6.791 - 3.183\sigma_g^{0.5} + 0.471\sigma_g \quad (\text{رابطه ۶})$$

در رابطه‌های بالا d_g^* فرم نرمال شده میانگین هندسی ذرات می‌باشد که به روش زیر محاسبه شده است:

$$d_g^* = d_g^{0.6} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در ادامه پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از مدل رایانه‌ای Rosetta با استفاده از درصد ذرات تشکیل دهنده و چگالی ظاهری خاک، برای برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در خاک استفاده شد.

ارزیابی‌های آماری

سپس برای مقایسه این پارامترها با پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده به روش حل معکوس، در سناریوهای تعریف شده، از شاخص‌های ضریب همبستگی پیرسون (r) (-)، ریشه میانگین

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	عمق (cm)	کلاس بافتی خاک	رس (%)	سیلت (%)	درصد سنگریزه (%)	شن (%)	K_s (cm min^{-1})	چگالی ظاهری (gr cm^{-3})	θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	FC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	PWP ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
	۰-۱۰	رس سیلتی	۴۲	۴۸	۱۵	۱۰	۰/۰۰۱	۱/۲۱	۰/۵۱۱	۰/۳۹۰	۰/۱۹۱
۱	۱۰-۳۰	رس سیلتی	۴۰	۴۶	۱۲	۱۴	۰/۰۰۵	۱/۳۱	۰/۵۰۳	۰/۳۸۷	۰/۱۸۴
	۳۰-۶۰	رس سیلتی	۴۰	۴۶	۱۲	۱۴	۰/۰۰۵	۱/۴۰	۰/۵۱۰	۰/۳۸۵	۰/۱۷۹
	۰-۱۰	لوم	۲۶	۴۴	۱۰	۳۰	۰/۰۰۸	۱/۴۵	۰/۴۴۳	۰/۳۳۳	۰/۱۸۱
۲	۱۰-۳۰	لوم	۲۶	۴۱	۸	۳۳	۰/۰۱۲	۱/۵۶	۰/۴۱۴	۰/۳۵۴	۰/۱۷۶
	۳۰-۶۰	لوم	۲۷	۴۲	۱۰	۳۱	۰/۰۰۹	۱/۶۱	۰/۴۴۳	۰/۳۳۱	۰/۱۸۰
	۰-۱۰	لوم شنی	۷	۴۹	-	۴۴	۰/۰۶۰	۱/۵۹	۰/۳۹۵	۰/۲۲۰	۰/۱۱۲
۳	۱۰-۳۰	لوم شنی	۷	۴۷	-	۴۶	۰/۰۸۰	۱/۶۶	۰/۳۸۶	۰/۲۵۲	۰/۱۲۱
	۳۰-۶۰	لوم شنی	۸	۴۷	-	۴۵	۰/۰۴۰	۱/۷۶	۰/۳۷۶	۰/۲۰۱	۰/۰۸۹

جدول (۲) نتایج حاصل از ارزیابی سه روش مورد استفاده در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، منحنی مشخصه رطوبتی حاصل از پارامترهای هیدرولیکی به‌دست آمده از روش معکوس در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، دارای کمترین میزان خطا و انحراف نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بوده است. بعد از روش حل معکوس، نرم‌افزار ROSETTA بیشترین دقت را در برآورد پارامترهای ون‌گنوختن داشت. نتایج تحقیقات *Schaap et al.* (1998) نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی اغلب دارای عملکرد

بهتری نسبت به روش‌های سنتی مانند رگرسیون چندگانه است. با این وجود *Merdun et al.* (2006) توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک پارامترهای هیدرولیکی خاک را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه، توسعه و واسنجی نمودند. آنها دریافتند که تفاوت بین دو روش از نظر آماری (در سطح ۵ درصد) معنی‌دار نبودند اما با این وجود، روش رگرسیون، توابع انتقالی پارامتریک و نقطه‌ای را بهتر از روش شبکه عصبی مصنوعی برآورد نمود. در پژوهش *Scherger et al.* (2020) نیز روش حل عددی معکوس با دقت بالاتری نسبت به شبکه عصبی ROSETTA، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را برآورد نمودند.

جدول ۲- ارزیابی آماری منحنی مشخصه رطوبتی برآورد شده به روش‌های مختلف برای خاک‌های مورد مطالعه

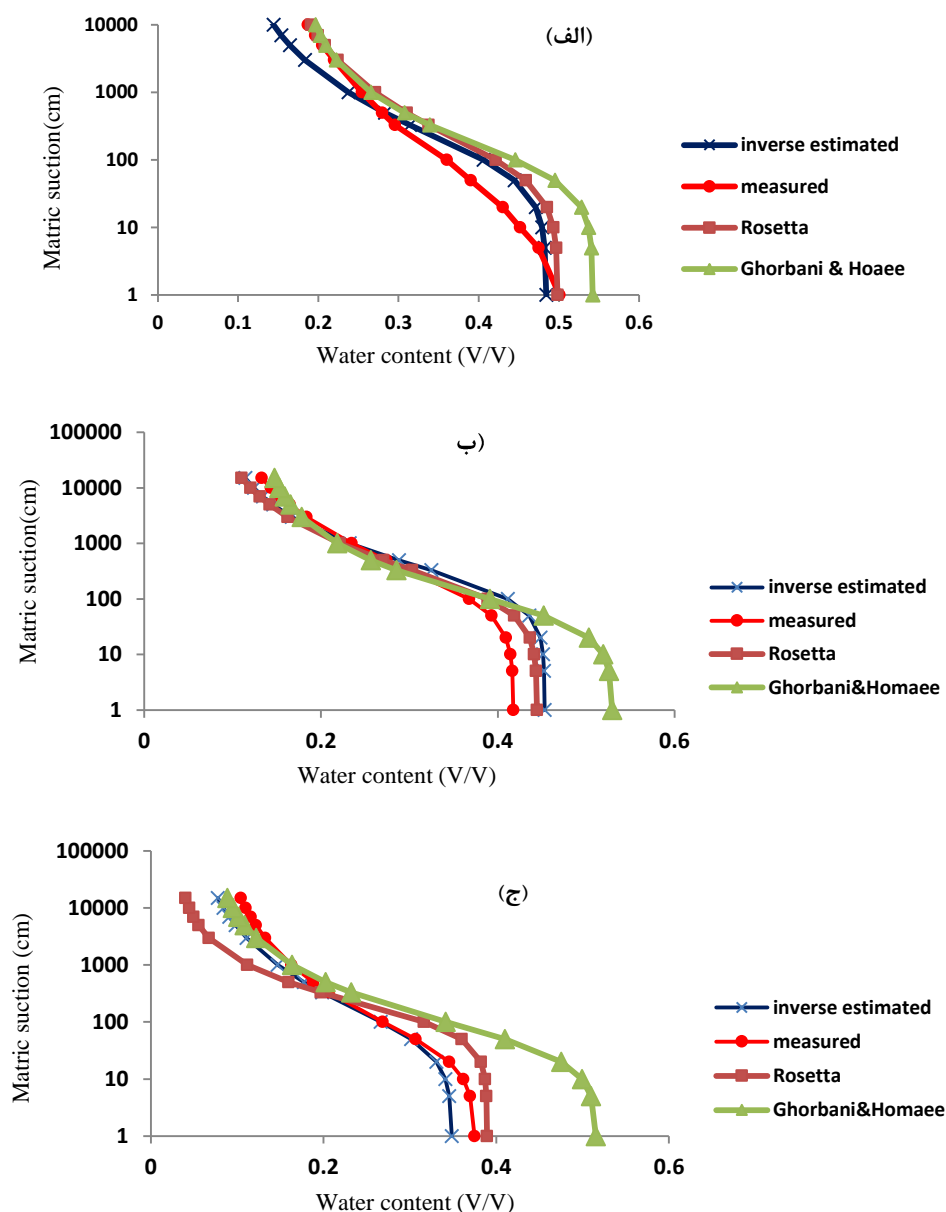
رتبه	MPearson	RMSD	MSD	MD
۱	۰/۹۸۸	۰/۰۳۶	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۸۳
۳	۰/۹۷۲	۰/۰۷۲	۰/۰۰۵	-۰/۰۳۳
۲	۰/۹۸۲	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳	-۰/۰۰۲

را از روی اندازه‌گیری‌های محدودی که بر روی نمونه‌های کوچک خاک در آزمایشگاه برآورد می‌نمایند، نمی‌توانند رفتار واقعی خاک را در شرایط طبیعی و در مقیاس مزرعه انعکاس دهند.

شکل (۲) منحنی مشخصه رطوبتی که از طریق روش‌های مذکور در خاک‌های مورد مطالعه برآورد شده است را در مقایسه با منحنی مشخصه رطوبتی که از طریق برازش داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به مدل ون‌گنوختن به کمک نرم‌افزار RETC اندازه‌گیری شد، را به تفکیک بافت خاک نشان می‌دهد. در این شکل نیز کمترین میزان اختلاف از نظر سطح زیر منحنی مشخصه رطوبتی، مربوط به روش حل معکوس با استفاده از آزمایش استوانه‌های دوگانه است.

نتایج حاصل از مقایسه منحنی مشخصه رطوبتی به دست آمده از تابع انتقالی مورد استفاده با مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، نیز نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر این تابع در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در روش استوانه‌های دوگانه است (جدول ۲). *Pachepsky and Rawls* (2004) گزارش نمودند که توابع انتقالی، غالباً برای منطقه‌ای که این توابع بر اساس ویژگی‌های خاک‌های آن منطقه پایه‌ریزی شده است، قابل استفاده است. همچنین *Nemes et al.* (2008) پیشنهاد دادند، به‌علت عدم اطمینان بالای توابع انتقالی، بهتر است توابع انتقالی را برای خاک، مدل و کاربری خاص اراضی مجدداً ارزیابی کرد.

پژوهش *Gribb et al.* (2009) و *Vereecken et al.* (2010) نیز نشان داد از آنجایی که این توابع ویژگی‌های هیدرولیکی خاک



شکل ۲- منحنی مشخصه رطوبتی برآوردشده از طریق روش‌های مختلف در خاک‌های مورد مطالعه: خاک رس سیلنتی (الف)، خاک لوم (ب) و خاک لوم‌شنی (ج)

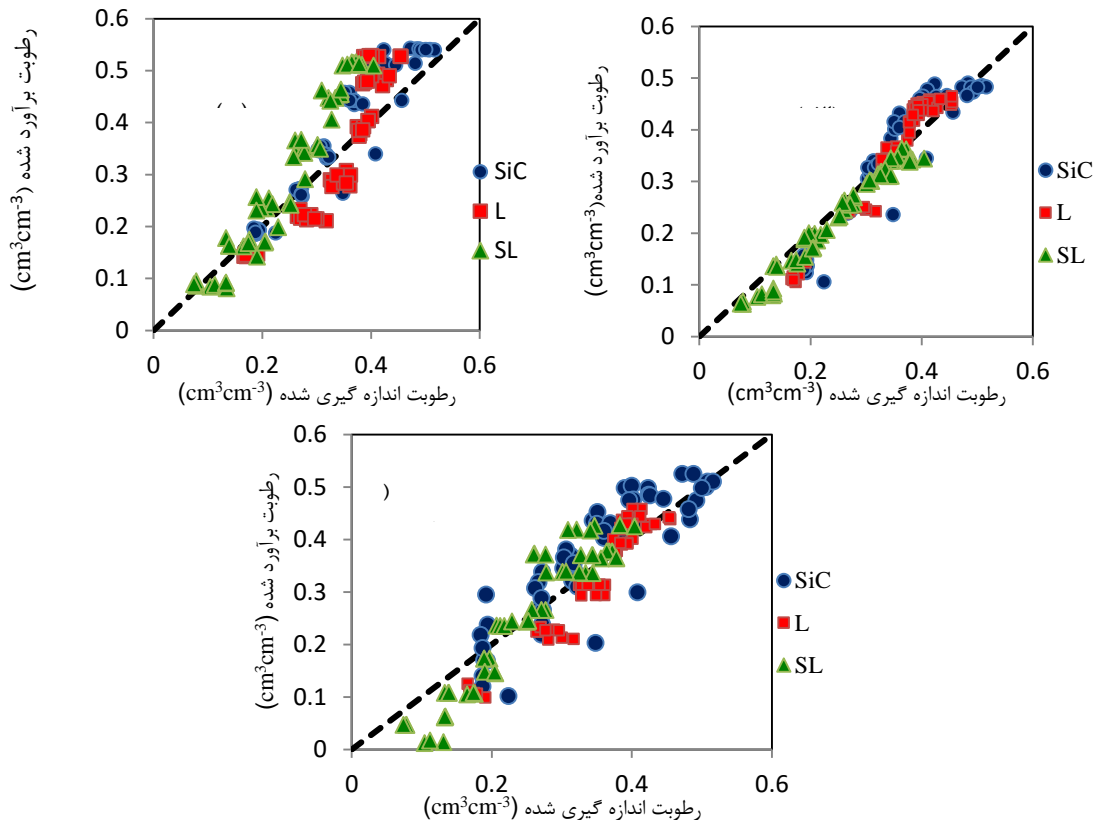
پژوهش انجام شده توسط Abbasi (2009) رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از روش حل معکوس نسبت به توابع انتقالی مورد استفاده از تطابق بسیار بالاتری برخوردار بود.

بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته، پارامترهای برآوردشده از روش‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در محل (In situ measurements) از دقت بیشتری نسبت به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برخوردار هستند (Mashayekhi et al., 2016; Mashayekhi et al., 2017; Scherger et al., 2020). تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مقیاس مزرعه و در آزمایش‌های در جا (In situ) به دلایل مختلفی بر سایر روش‌ها برتری دارد. از جمله مزایای این روش‌ها این است که به هم خوردگی خاک به

شکل (۳) پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و برآوردشده توسط روش‌های حل معکوس، تابع انتقالی و نرم افزار Rosetta را در اطراف خط یک به یک برای نمونه‌خاک‌های مورد استفاده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشترین هم‌خوانی بین داده‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های آزمایش استوانه‌های دوگانه دیده می‌شود. بیشترین ضریب تبیین (R^2) بین میزان رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده در مورد داده‌های به دست آمده از روش استوانه‌های دوگانه بود ($R^2=0/9363$) و بعد از آن به ترتیب داده‌های رطوبت حجمی برآوردشده به کمک نرم افزار Rosetta ($R^2=0/8629$) و تابع انتقالی قربانی دشتکی و همایی ($R^2=0/8401$) قرار گرفتند. در

آن در طول اندازه‌گیری‌های میدانی، معمولاً بدون تغییر نگه داشته می‌شود. همچنین اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از طریق روش‌های آزمایشگاهی علاوه بر دشواری و هزینه‌بر و زمان-بر بودن، نمی‌تواند نشان‌دهنده رفتار هیدرولیکی خاک در مقیاس مزرعه باشد (Asgarzadeh *et al.*, 2014).

حداقل می‌رسد؛ در حالی که نمونه‌برداری از خاک و آماده‌سازی نمونه‌ها پیش از انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، شرایط خاک را تغییر داده و باعث افزایش خطا در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی آن می‌شود. همچنین حجم خاک مورد آزمایش در روش‌های مزرعه‌ای بیشتر است. شرایط مرزی خاک و لایه‌بندی



شکل ۳- پراکنش مقدار بر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط روش‌های استوانه‌های دوگانه (الف)، تابع انتقالی قربانی دشتکی و همایی (ب) و نرم افزار Rosetta (ج)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سه روش غیر مستقیم شامل روش حل عددی معکوس، تابع انتقالی و شبکه عصبی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد روش حل عددی معکوس که عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری‌های در جا در شرایط طبیعی و واقعی است می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با دقت قابل قبولی در مقیاس میدانی برآورد کند. ضمن این که ازران‌تر بوده و از سهولت بالاتری نسبت به انجام اندازه-گیری‌های مستقیم برخوردار است. در روش‌های توابع انتقالی و شبکه‌های عصبی، داده‌های ورودی مورد نیاز شامل ویژگی‌های فیزیکی از جمله بافت و چگالی ظاهری است که مبتنی بر روش-های آزمایشگاهی بوده و بر روی نمونه‌های کوچک و دست‌خورده خاک انجام می‌شوند؛ بنابراین نتایج به دست آمده از دقت قابل

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 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; Scell *et al.*, 2012). همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روش‌های توابع انتقالی و شبکه‌های عصبی عمدتاً بر اساس ویژگی‌های فیزیکی از جمله بافت و چگالی ظاهری است که از طریق روش‌های آزمایشگاهی و با استفاده از نمونه‌های کوچک و دست‌خورده خاک اندازه‌گیری می‌شوند، پایه‌ریزی می‌گردند؛ بنابراین نتایج به دست آمده از در این روش‌ها در مقایسه با روش‌های حل عددی معکوس از دقت کمتری برخوردار خواهند بود.

هیدرولیکی باشد و قادر است پارامترهای معادله ون گنوختن را با دقت قابل قبولی، در مقایسه با توابع انتقالی، تخمین بزند.
"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

قبولی به ویژه در مقیاس میدانی برخوردار نخواهند بود. بنابراین روش حل عددی معکوس، می‌تواند جایگزین قابل اعتمادی برای روش‌های استاندارد و رایج آزمایشگاهی در برآورد پارامترهای

REFERENCES

- Abbasi, F. (2009). Assessment of Indirect Methods to Estimate Soil Hydraulic Properties for Simulating Soil Moisture in a Sandy Loam Soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 9 (4), 31-44. (In Persian).
- Abbasi, F., and Tajic, F. (2007). Simultaneous estimation of hydraulic parameters and solute transportation by inverse solution method at field scale. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 11 (1): 111-122.
- Abd Rashid, N.S., Askari, M., Tanaka, T., Simunek, J., and 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., 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.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Dexter, A. R., Mahboubi, A. A., and Neyshabouri, M. R. (2014). Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, (226-227), 8-20.
- Babaeian, E., Homae, M., and 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).
- Bahrami, A., and Aghamir, F. (2020). Simulation of vadose zone flow processes via inverse modeling of modified multistep outflow for fine-grained soils. *Soil Science Society of America Journal*, 84 (5).
- Baker, L., and Ellison, D. (2008). Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, 144, 212-224.
- Blake, G.R., and 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.
- Charles, W., Oluwapelumi, O. (2021). Predictive modelling of soils' hydraulic conductivity using artificial neural network and multiple linear regression. SN Applied Sciences.3. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03974-7>.
- Dobarco, M.R., Isabelle Cousin, 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.
- Da Silva Junior, J.J., Colombo, A., Oliveira, G.C., Silva, B., and Juliaci, J. (2020). Estimation of tropical soils' hydraulic pro-perties with inverse method and tension infiltrometer field data. *Ambiente & Água*, 15(3), 1-15.
- Ebrahimi, F., and Raoof, 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).
- Ethan, D.G., and Eric, E. S. (2007). A comparison of land surface model soil hydraulic properties estimated by inverse modeling and pedotransfer functions. *Water Resourse Research*, 43. W05418.
- Fooladmand, H.R. (2011). Pedotransfer functions for point estimation of soil moisture characteristic curve in some Iranian soils. *African Journal of Agricultural Research*, 6(6), 1586-1591.
- 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(1), 68-74.
- 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.
- Gunarathna, M.H., Sakaic, K., Nakandakaric, T., Momiid, K., Kumaria, M.K.N., and Amarasekaraa, M.G.T.S. (2019). Pedotransfer functions to estimate hydraulic properties of tropical Sri Lankan soils. *Soil & Tillage Research* 190, 109-119.
- Jafari Gilandeh, S., Rasoulzadeh, A., and Khodaverdiloo, H. (2013). Evaluating some pedotransfer functions for simulation of transient water flow in soil. *Conservation of soil and water resources*, 2(4), 1-13. (In Persian).
- Kirkham, J.M., Smith, C.J., Doyle, R.B., and Brown, P.H. 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). Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 1526-1536.
- 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).
- Merdun, H., Cinar, O., Meral, R., and Apan, M. (2006). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90, 108-116.
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorjib, M Miles Dyck, M., and Ghorbani Dashtakia, S. (2013). Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes Archives of Agronomy and Soil Science.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Naik, A. P., Ghosh, B., and Pekkat, S. (2018). Estimating soil hydraulic properties using mini disk infiltrometer. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(1), 2164-3040.
- Nakhaei, M. and 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.
- Nemes, A., Roberts, R.T., Rawls, W.J., Pachepsky, Ya. A., and van Genuchten, M.Th. (2008). Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the non-parametric k-Nearest Neighbor technique. *Environmental Modelling and Software*, 23, 254-255.
- Pachepsky, Y., and Rawls, W.J. 2004. Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. 30, Pp, 512.
- Rastgou, M., Bayatb, H., Mansoorizadehc, M., Gregoryd, A.S. (2020). Estimating the soil water retention curve: Comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- Scharnagl, B., Vrugt, J. A., Vereecken, H., and Herbst, M. (2011). Inverse modeling of in situ soil water dynamics: investigating the effect of different prior distributions of the soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3043-059.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th. (1998). Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 847-855.
- Schaap, M. G., and van Genuchten, M.Th. (2001). ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Schelle, H. Iden S.C., Schlüter, S., Vogel, H.J. and Durner, W. (2012). Identification of effective flow processes and properties from virtual soils using inverse modeling. *Geophysical Research Abstracts*, 14.
- 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.
- Trejo-Alonso J., Carlos Fuentes, C., Chávez, C., Quevedo, A., Gutierrez-Lopez, A., and Brandon González-Correa, B. (2021). Saturated Hydraulic Conductivity Estimation Using Artificial Neural Networks *Water*, 13, 705.
- 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.
- Vrugt, J. A., Stauffer, P. H., Wöhling, Th., Robinson, B.A., and Vesselinov, V.V. (2008). Inverse modeling of subsurface flow and transport Properties: a review with new developments. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 843-864.