

ارزیابی روش‌های برآورد رطوبت ظرفیت زراعی در خاک‌های استان خوزستان

امید شیخ اسماعیلی^{۱*}، هادی معاضد^۲، عبدالعلی ناصری^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲. استاد گروه مهندسی آب. ۳. دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۷/۲۷)

چکیده

تخمین غیرمستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی محیط‌های متخلخل بر پایه مشخصات زودیافت آن در قالب توابع انتقالی به عنوان راه حلی کم‌هزینه و سریع در مسائل آبیاری و زهکشی بسیار پرکاربرد شده است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد روش‌های مرسوم برآورد رطوبت ظرفیت زراعی برای معرفی تابع انتقالی مناسب خاک‌های منطقه استان خوزستان در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه انجام شد. به منظور رصد وضعیت رطوبتی خاکها در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی اقدام به کارگذاری حسگرهای دفنی دستگاه انعکاس سنجی امواج (TDR) در اعماق مختلف و انجام آبیاری قطره‌ای از نوع نقطه‌ای-سطحی با دبی چهار لیتر در ساعت شد. سپس، ویژگی‌های فیزیکی خاک همراه با مقادیر رطوبت در مکش‌های معین برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی مدل رطوبتی Van Genuchten-Mualem (1980) به کمک نرم‌افزار RETC اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش در ارزیابی عملکرد چندین تابع انتقالی معروف نشان داد که مدل‌های نیمه تجربی متکی بر اصول فیزیکی که در سطح مزرعه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند می‌تواند جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی تخمین میزان رطوبت ظرفیت نگهداری آب در خاک باشد. به طوری که تابع انتقالی Twarakavi *et al.* (2009) با آماره‌های $NRMSE$ (۰/۳۱) و SE (۰/۵۱) توانست رطوبت ظرفیت زراعی را با دقت خوبی نسبت به دو روش شبکه عصبی Rosetta (2001) با مقادیر $NRMSE$ (۰/۵۲) و SE (۰/۷۱) یا معادله Dexter (2004) با مقادیر $NRMSE$ (۰/۹۷) و SE (۰/۱۷۵) برآورد کند. هر چند، تفاوتی در کارایی مدل (ME) برای هر سه تابع انتقالی ملاحظه نشد. بر اساس نتایج ارزیابی این توابع انتقالی با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه در سطح معنی‌داری پنج درصد به وضوح مشاهده شد اثرات منفی میزان شن و تراکم خاک بر مقادیر رطوبت ظرفیت زراعی قابل توجه است. بر عکس، میزان رس و سیلت در سطح معنی‌داری پنج درصد دارای تأثیر مثبت افزایشی بر مقادیر رطوبت ظرفیت زراعی داشت.

واژه‌های کلیدی: تابع انتقالی، مدل نیمه تجربی، منحنی رطوبتی خاک

مقدمه

کردند که بافت خاک می‌تواند بهترین ابزار برای برآورد رطوبت قابل دسترس خاک در نظر گرفته شود. خاک‌های رسی چون آب بیشتری در خود نگه می‌دارند، پس از آبیاری یا بارندگی، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت مطلوب عملیات زراعی یا اصطلاحاً حالت گاورو^۲ در آنها طولانی‌تر از دیگر بافت‌ها است. همچنین، ظرفیت نگهداری آب، ذخیره عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک‌های ریزبافت بیشتر از خاک‌های درشت‌بافت است. اما از سوی دیگر، سرعت حرکت آب و هوا و نفوذ ریشه در خاک‌های ریزبافت، متناسب با افزایش مقدار رس و فشردگی خاک کاهش می‌یابد. اکثر این ویژگی‌های فیزیکی و بعضاً برخی شاخص‌های کیفی در منحنی مشخصه رطوبتی خاکها قابل بررسی و ارزیابی است. لذا،

بافت خاک را می‌توان مهمترین ویژگی فیزیکی پایدار خاک دانست که کاربردهای فراوانی در اغلب پژوهش‌ها و طرح‌های اجرایی به ویژه در تهیه منحنی مشخصه رطوبتی^۱ (SWRC) کاربرد دارد (Pachepsky and Rawls, 2004). زیرا روی سایر ویژگی‌های خاک مانند جرم مخصوص ظاهری، ذخیره رطوبتی، ساختمان، نفوذپذیری، ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار ماده آلی تأثیر می‌گذارد. بافت خاک همچنین بر روی سهولت کار در مزرعه، جوانه زدن بذور و رشد گیاهان مؤثر است. McKenzie and MacLeod (1989) طی پژوهش‌های خود در استرالیا اعلام

* نویسنده مسئول: omid.sheikh@hotmail.com

1. Soil Water Retention Curve (SWRC)

به دلیل این واقعیت بوده است که θ_{fc} یک ویژگی بسیار مهم و ضروری برای برآورد آب قابل دسترس و تعیین عمق آبیاری برای زراعت و مدیریت کشاورزی است (Cong *et al.*, 2014; Teixeira *et al.*, 2014).

متخصصین تکنیک‌ها و معیارهای کمی متفاوتی را برای برآورد θ_{fc} ارائه کردند که شامل سنجش: (۱) پتانسیل ماتریک خاک، مانند ۱۰۰، ۳۳۰ و ۵۰۰ سانتی‌متر به ترتیب برای خاکهای شنی، لومی و رسی (Romano and Santini, 2002; Pachepsky and Rawls, 2004).

(۲) مدت زمان زهکشی پس از آبیاری، مانند ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت به ترتیب برای خاکهای شنی، لومی و رسی (Klute, 1986) و (۳) رسیدن به سرعت نفوذ پایه، مثلاً ۰/۰۵ سانتی‌متر در روز (Nachabe, 1998; Cong *et al.*, 2014; Hillel, 1998) می‌باشد.

Nachabe (1998) به لحاظ پویایی جریان آب در خاک به این نتیجه رسید زمانی رطوبت خاک مزرعه به نقطه θ_{fc} می‌رسد که دبی جریان غیراشباع در واحد سطح یا اصطلاحاً ضریب زهکشی (q_{fc}) خاک مربوطه با میزان سرعت تبخیر و تعرق روزانه یکسان شود. Meyer and Gee (1999) مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ سانتی‌متر در روز را با توجه به سرعت نفوذ نهایی آب در خاکهای مختلف به ترتیب برای تعیین رطوبت در نقطه θ_{fc} در خاکهای شنی، لومی و رسی مناسب دانستند.

بر این اساس، محققین دیگری نظیر Ratliff *et al.* (1983) پیشنهاد نمودند زمانی رطوبت خاک را در نقطه θ_{fc} در نظر گرفته شود که میزان تغییرات سرعت نفوذ آب در خاک تقریباً به ۰/۱ الی ۰/۲ درصد در روز برسد. البته، این محدوده تغییرات ناچیز هم بنا به نظر Pachepsky and Rawls (2004) می‌تواند ناشی از خطای انجام آزمایش‌ها باشد. به عبارت دیگر، سرعت حرکت آب در خاک در نقطه θ_{fc} به مقدار تقریباً ثابتی در حد صفر می‌رسد. محققین دیگری، نظیر Twarakavi *et al.* (2009) سعی در تعیین θ_{fc} از روی منحنی مشخصه رطوبتی خاک کردند. برای این کار، آنها با استفاده از نرم‌افزار شبکه عصبی Rosetta (Van Genuchten, 2001)، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای معادله Van Genuchten (1980) برای ۱۲ کلاس بافت خاکهای آمریکا و سپس برآورد منحنی مشخصه هدایت هیدرولیکی طبق معادله Van Genuchten-Mualem (1980) با جایگذاری مقادیر متفاوت ضریب زهکشی (۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ سانتی‌متر در روز) به جای هدایت هیدرولیکی غیراشباع همراه با گرادیان هیدرولیکی واحد

به جرأت می‌توان گفت برآورد منحنی‌های مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی برای بافت خاک مورد مطالعه می‌تواند نقشی بسیار مهم و کلیدی در مدل‌سازی حرکت آب و املاح در محیط‌های متخلخل ایفا کند (Calciu *et al.*, 2011). به عبارت دیگر، اهمیت فراوان این منحنی‌ها در آبیاری و زهکشی به خاطر تبیین تأثیر ساختمان خاک، تخلخل، توزیع اندازه خلل و فرج و جذب سطحی بر وضعیت رطوبتی خاک است (Robbins and Wiegand, 1990).

"رطوبت معادل" به عنوان اولین اصطلاح تعریف شده برای رطوبت خاک توسط Briggs and McLane (1990) شامل "بخشی از آب بر حسب درصد که خاک می‌تواند با نیروی گریز از مرکز ۱۰۰۰ برابر گرانش ثقل زمین برای مدت ۳۰ دقیقه در خود نگه دارد" ارائه شد. لکن، پژوهشگران به دلیل کاربردی نبودن رطوبت معادل در مزرعه به ویژه در خاکهای درشت‌بافت به تشریح اصطلاح "ظرفیت زراعی" که توسط Veihmeyer and Hendrickson (1931) مطرح شده بود روی آوردند.

ظرفیت زراعی مزرعه (θ_{fc}) را هنوز هم پرکاربردترین پارامتر طراحی برنامه‌ریزی آبیاری می‌دانند که تاکنون توصیف کمی دقیقی برای آن ارائه نشده است (Novák and Havrila, 2006). در تعریف کلاسیک، زمانی رطوبت خاک در نقطه θ_{fc} در مزرعه است که تخلیه آب ثقلی از خلل و فرج درشت پایان یافته باشد و انتقال بخش اعظم رطوبت خاک از خلل و فرج ریز تحت تأثیر نیروی موئینگی رخ دهد (Veihmeyer and Hendrickson, 1931). لذا، این تعریف مبهم بر اساس "خروج آب ثقلی" باعث شده که برآورد θ_{fc} تنها به استناد تجارب موردی انجام پذیرد. زیرا جریان آب در خاک ذاتاً پدیده‌ای پویا بوده و حتی در حالت بخار نیز به طور پیوسته ادامه می‌یابد. با این تفسیر، هدایت هیدرولیکی آب در خاک هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد.

حال سؤال اساسی اینجاست که چه زمانی و در چه مقداری از هدایت هیدرولیکی به θ_{fc} می‌توان رسید Hillel (1998) معتقد است در وهله اول، چون هنوز هیچ سیستم آزمایشگاهی استاندارد برای تشخیص و تعیین ویژگی‌های پویایی آب در خاک به طور درجا وجود ندارد. لذا، θ_{fc} باید در مزرعه اندازه‌گیری شود تا جنبه پویایی آب در خاک به طور واقعی لحاظ شده باشد. سپس، این روش مزرعه‌ای استاندارد شده در قالب دستورالعملی منطقی قابل تکرار باشد (Klute, 1986). بنابراین، نیاز به ارائه تعریفی کاربردی‌تر به لحاظ کمی

یکی از رایج‌ترین مدل‌ها برای تخمین *SWRC* است زیرا شکلی سیگموئیدی و پیوسته از آن برآورد می‌کند. از مزایای این مدل می‌توان به انعطاف‌پذیری بالا و استفاده از دامنه مکش‌های زیاد و قابلیت برآزش برای خاک‌های متفاوت اشاره کرد. همچنین پارامترهای این مدل مفهوم فیزیکی دارند. Dexter (2004) نیز توانست با دو بار مشتق‌گیری از معادله Van Genuchten (1980) رابطه زیر را از طریق یافتن نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی به عنوان رطوبت مطلوب برای زمان اجرای عملیات زراعی یا گاو رو شدن ارائه کند:

$$\theta_{inf} = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + \theta_r \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{رابطه ۳})$$

Schaap *et al.* (2004) با بررسی چند تابع انتقالی منحنی رطوبتی معتبر نظیر Wösten *et al.* (1999) Cosby *et al.* (1984) Vereecken *et al.* (1989) و Rawls and Brakensiek (1985)، برای ۴۷۴۳۵ نمونه خاک از بانک اطلاعاتی اداره حفاظت منابع طبیعی آمریکا اعلام کردند این روابط همگی میزان رطوبت را حدود ۰/۸ الی ۲/۸ درصد کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کنند. همچنین، آنها اعلام نمودند که افزایش تعداد و نوع برخی متغیرهای ورودی در این توابع انتقالی ضروری نبوده و تأثیر معنی‌داری بر دقت برآوردها ندارد. از سوی دیگر، هر چند برخی ویژگی‌های شیمیایی خاکها نظیر میزان کربن آلی یا ظرفیت تبادل کاتیونی نیز بعضاً معرف‌های خوبی برای برآورد میزان رطوبت مزرعه توسط خاکشناسان گزارش شده است (Tessier *et al.*, 1999). لیکن، نمی‌توان از آنها به عنوان پارامترهای پایدار برای برنامه‌ریزی آبیاری استفاده نمود زیرا مقادیر آنها طی عملیات کشت و کار در فصول مختلف به طور قابل توجهی تغییر پیدا می‌کند. همچنین، برخی پژوهشگران نظیر Epebinue and Nwadialo (1994) پس از آزمایش‌هایی خود اعلام کردند اثرات مثبت و معنی‌داری از تأثیر مواد آلی بر میزان θ_{fc} مشاهده نکردند. بر این اساس، تاکنون دستورالعمل جامع و مشخصی ارائه نشده است که نشان دهد توابع انتقالی خاک‌های مختلف در چه مناطقی و تحت چه شرایطی قابلیت کاربرد دارند (Pachepsky and Rawls, 2004). در واقع، اهمیت ارائه اینگونه توابع انتقالی و یا نمایش *SWRC* به صورت تابع ریاضی در این است که می‌توان از آنها برای تخمین رطوبت و حرکت املاح در نیمرخ خاک با استفاده از مدل‌های نرم‌افزاری انتقال املاح استفاده کرد (Simunek *et al.*, 2005). از سوی دیگر، روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی برای اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند. هر چند، محلی بودن اعتبار توابع انتقالی را می‌توان از مهمترین نقاط ضعف آنها

در حالت جریان موئینگی، Nachabe (1998)، به صورت زیر پرداختند:

(رابطه ۱)

$$q_{fc} = K_s \cdot \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \cdot \left[1 + \left(1 - \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2$$

سپس، با استفاده از نرم‌افزار Hydrus-1D و کاربرد روش حل معکوس متوجه شدند که دبی ۰/۰۱ سانتی‌متر در روز، برخلاف نظر Meyer and Gee (1999)، نسبت به مقادیر ۰/۱ و ۰/۰۱ سانتی‌متر در روز می‌تواند ملاک بهتری برای تخمین θ_{fc} باشد. در نهایت، تابع انتقالی زیر را ارائه نمودند:

$$S_{fc} = \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = n^{-0.60(2 + \log K_s)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آنها، q_{fc} : ضریب زهکشی در نقطه ظرفیت زراعی، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_{fc} : رطوبت ظرفیت زراعی، θ_s : رطوبت اشباع خاک، θ_r : رطوبت باقی‌مانده در خاک، m : شاخص تقارن منحنی مشخصه رطوبتی، l : شاخص پیوستگی خلل و فرج خاک، S_{fc} : درجه اشباع نسبی در نقطه ظرفیت زراعی و n : شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشد. تابع انتقالی Rosetta (2001) با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی توسط Schaap *et al.* (2001) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا بسط و توسعه یافت. به طور کلی، همه محققان به این نتیجه رسیده‌اند که معمولاً وقتی تعداد پارامترهای ورودی به بیش از سه پارامتر می‌رسد توابع انتقالی مبتنی بر شبکه عصبی بهتر از مدل‌های رگرسیونی عمل می‌کند (Baker and Ellison, 2008). در واقع، تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی دیریافت خاک (مانند منحنی رطوبتی) با استفاده از برخی اطلاعات موجود و زودیافتی (مانند بافت خاک) که اندازه‌گیری آنها کم‌هزینه، سریع و آسان است معمولاً به وسیله معادلات رگرسیونی صورت می‌پذیرد که به توابع انتقالی (PTFs) موسومند (Bouma, 1990). به همین منظور در دهه اخیر، روش‌های غیرمستقیم زیادی نظیر توابع انتقالی برای تخمین ویژگی‌های کمی و کیفی خاکها به طور چشمگیری مورد توجه محققین قرار گرفته و توسعه پیدا کرده‌اند (Twarakavi *et al.*, 2009).

Hall *et al.* (1977) به ارائه روابطی بین بافت خاک و بسیاری از ویژگی‌های هیدرولیکی آن مانند رطوبت در نقطه پژمردگی، ظرفیت زراعی و رطوبت قابل دسترس در خاک‌های مناطق انگلستان و ولز پرداختند. مدل Van Genuchten (1980)

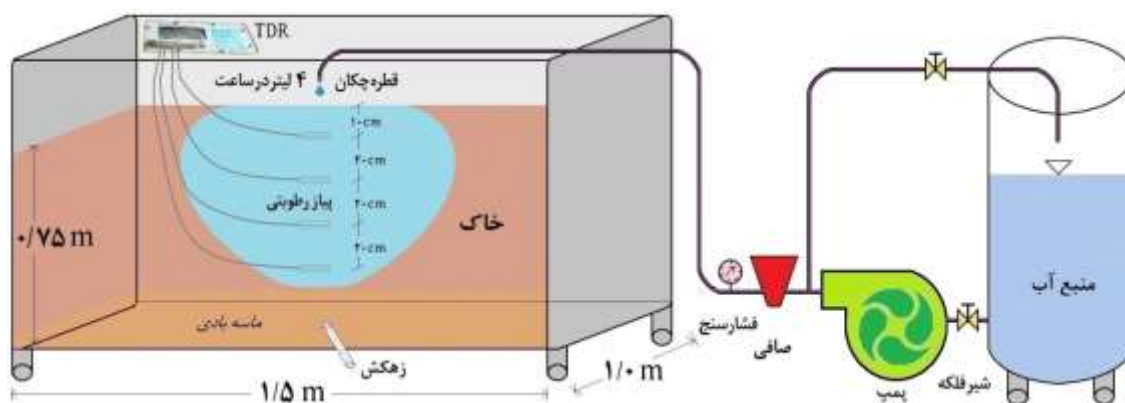
بستان و شوش و بافت شنی لومی نیز از جنوب شرق استان، دشت خیرآباد حوالی شهرستان امیدیه به مزرعه آزمایشی یاد شده حمل شد. ابتدا، پیش از انجام آزمایش‌ها، خاک زراعی سطحی در عمق کمتر از ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از شخم، دیسک و سپس گاواهن‌دوار به حالت پودری درآمده تا به راحتی از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) عبور داده شوند. به منظور انجام آزمایش‌ها در شرایط واقعی مزرعه، اقدام به حفر گودالی به ابعاد ۳×۴ مترمربع و عمق یک متر در این مزرعه آزمایشی شد. سپس، سه بافت خاک در سه بخش مجزا و در کنار هم با لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری ریخته و با غلتک دستی ۱۰۰ کیلوگرمی کوبیده شد. برای ایجاد شرایط زهکشی آزاد نیز در کف گودال از ماسه بادی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و یک لوله زهکش سوراخدار پلاستیکی به قطر ۱۵ سانتی‌متر و طول چهار متر دارای فیلتر مصنوعی از الیاف پشمی استفاده شد. به طور همزمان، تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی نیز برای مدل فیزیکی با بدنه‌ای از جنس آهن و نمای پلکسی‌گلاس به ابعاد ۱×۱/۵ مترمربع و عمق ۰/۸ متر همراه با چند مجرای خروجی برای زهکشی آزادانه و ماسه بادی به عمق پنج سانتی‌متر در کف آن تعبیه شد (شکل ۱). همچنین، به منظور جلوگیری از بروز جریان‌های ترجیحی در حین آزمایش با استفاده از روغن جلا و پاشیدن ماسه بادی به دیواره‌ها، سطوحی نسبتاً زبر ایجاد شد.

دانست و باید با احتیاط و تنها برای تخمین ساده در سایر مناطق دارای سری خاک متفاوت به کار برد. لذا، اثر منطقه‌ای بودن توابع انتقالی از یک سو و محدود بودن توابع انتقالی توسعه یافته برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاکهای ایران از دیگر سو، می‌تواند بیانگر اهمیت مطالعه و پژوهش در خصوص توابع انتقالی باشد (Saxton and Rawls, 2006). همچنین، مشابه بودن شرایط خاکها و تناسب اقلیمی هرگز نمی‌تواند تضمینی برای مناسب بودن توابع انتقالی استخراج شده در یک منطقه برای سایر مناطق مشابه باشد و این موضوع نشان دهنده ضرورت ارزیابی توابع انتقالی خاص خاکهای هر منطقه است. هدف از انجام پژوهش حاضر، معرفی تابع انتقالی مناسب برای خاکهای منطقه استان خوزستان با استفاده از ارزیابی روشهای مرسوم برآورد رطوبت ظرفیت زراعی بود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش و نمونه برداری خاک

در این پژوهش، سه نوع بافت از خاکهای معمول زراعی مناطق مختلف استان خوزستان مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرکز استان، از خاک حاضر در مزرعه آزمایشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران در حاشیه رودخانه کارون اهواز با بافت لومی استفاده شد. دو نوع بافت دیگر، شامل بافت لومی شنی از غرب استان، واقع در دشت باغه حد فاصل شهرستان‌های



شکل ۱- شمایی از مدل فیزیکی آزمایشگاهی

سانتی‌متر در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی حین خاکریزی شد. از ویژگی‌های بارز این روش را می‌توان دقت و قابل اطمینان بودن آن دانست که قادر به اندازه‌گیری مقادیر رطوبت و املاح به طور همزمان در خاک است (Hart and Lowery, 1998).

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک

به منظور رصد میزان رطوبت حین آبیاری و پس از آن در هنگام زهکشی، اقدام به کارگذاری حسگرهای دفنی دستگاه انعکاس سنجی امواج^۱ (TDR) در اعماق ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰

1. TRASE SYSTEM 6050X1 made in Soil Moisture Co.

میزان رطوبت کلیه خاکها در حالت ظرفیت زراعی نیز پس از اتمام هر آبیاری در عمق ۲۰ سانتی‌متر (Pachepsky and Rawls, 2004) از میانگین قرائت‌های TDR در اعماق ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر بدست آمد. در اولین بازه زمانی ۲ ساعته که اختلاف مقادیر قرائت شده TDR کمتر از یک درصد بود به عنوان ملاک انتخاب مقادیر رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی برای هر بافت خاک در نظر گرفته شد. واسنجی دستگاه TDR نیز پس از اتمام هر سری آزمایش برای خاک مربوطه انجام شد. این آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل با ۱۸ نمونه شامل عوامل فیزیکی زود یافت خاک (جرم مخصوص ظاهری و میزان شن، سیلت و رس) در قالب طرح بلوکهای کاملاً تصادفی طراحی و در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی با سه تکرار انجام شد. همچنین، در حین انجام آزمایش‌ها نیز سطح خاک برای جلوگیری از تبخیر، با ورقه‌های فرسوده ایزوگام پوشاند شد.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی توابع انتقالی از آماره‌های کارایی مدل^۱ (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۲ (NRMSE) و خطای استاندارد^۳ (SE) با واحدهای درصد حجمی استفاده شد (Pachepsky and Rawls, 2004; Vereecken et al, 2010):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i - M_i) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$NRMSE = \frac{100}{\bar{M}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

(رابطه ۸)

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(E_i - \bar{E}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \right]}$$

که در آنها، E_i و M_i به ترتیب درصد رطوبت حجمی θ_{fc} تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده خاک، \bar{E} و \bar{M} نیز به ترتیب میانگین مقادیر آنها و N تعداد داده‌ها است.

نتایج و بحث

ویژگی و مشخصات خاک‌ها

هرچند هدف اصلی از کاربرد توابع انتقالی SWRC آن است که دیگر نیازی به اندازه‌گیری‌های وقت‌گیر و پرهزینه نباشد، لیکن ضروری است ابتدا SWRC و سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

در انتهای کار آماده‌سازی، اقدام به چهار نوبت آبیاری هفتگی با عمق ۱۰ سانتی‌متر برای آبخوبی خاکها شد. از سوی دیگر، خیس و خشک شدن متوالی خاکها طی یک ماه منجر به تشکیل خاکدانه‌ها و ساختمانی طبیعی همراه با ایجاد نشست اولیه و شرایط رطوبتی یکنواخت در نیمرخ آنها شد. سپس، نمونه‌برداری از خاکها برای تعیین شرایط اولیه پیش از شروع آزمایش‌ها انجام گرفت. همچنین، برای تهیه منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در مکش‌های صفر، ۲، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از دستگاه جعبه شنی و در مکش‌های بالاتر شامل ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر نیز از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد (Vereecken et al, 2010). سپس در ادامه، این داده‌ها برای استخراج ضرایب مدل VanGenuchten (1991) با اجرای نرم‌افزار RETC مورد استفاده قرار گرفت:

(رابطه ۴)

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

به این ترتیب، ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی خاکها مطابق مدل Van Genuchten (1980) با استفاده از نرم‌افزار Excel 2014 انجام شد. همچنین، معادله منحنی مشخصه هدایت هیدرولیکی خاکها نیز با فرض ۰/۵ برای پارامتر l و جایگذاری این ضرایب در مدل VanGenuchten-Mualem (1980) بدست آمد (Mualem 1976):

(رابطه ۵)

$$K_h = K_s \cdot \left(\frac{\theta_h - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta_h - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2$$

همچنین، هدایت هیدرولیکی اشباع خاکها در مزرعه آزمایشی به روش چاهک معکوس و برای مدل فیزیکی نیز به روش آزمایشگاهی بار ثابت با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در سه تکرار انجام شد. برای رصد تغییرات زمانی وضعیت رطوبت خاک به لحاظ مقدار و موقعیت آن در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی، در سری اول انجام آزمایش‌ها، پس از اتمام ۱۰ ساعت آبیاری با سیستم قطره‌ای موجود که دارای دبی چهار لیتر در ساعت از نوع سطحی- نقطه‌ای تنظیم‌کننده فشار بود اقدام به قرائت رطوبت خاکها در بازه‌های زمانی دو ساعته طی پنج روز، از ساعت ۸ صبح الی ۸ شب شد. سپس در سری دوم، به منظور رصد وضعیت رطوبتی در شب‌های سری اول، اقدام به آبیاری شبانه از ساعت ۸ شب الی ۶ صبح به مدت ۱۰ ساعت و انجام قرائت‌ها در بازه‌های زمانی دو ساعته طی روز شد.

1. Model Efficiency
2. Normalized Root Mean Square Error
3. Standard Error

تعدادی از خاکهای منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شود و پس از ارزیابی توابع انتقالی موجود روی داده‌های اندازه‌گیری شده، مناسب‌ترین تابع را برای منطقه تعیین کرد تا از آن به بعد بتوان از آن توابع برای تخمین *SWRC* استفاده نمود. در جدول (۱)، برخی مشخصات فیزیکی خاکهای مورد استفاده در مزرعه آزمایشی و مدل فیزیکی در آزمایشگاه خاکشناسی ارائه شده است. بر اساس جدول (۱)، در خاکهای لومی شنی و شنی لومی مشاهده می‌شود مقادیر θ_s دو برابر میزان θ_{fc} است (Robbins and Wiegand, 1990). در حالی که این نسبت برای خاک لومی تقریباً ۱/۵ بود. همچنین، بر اساس مشخصات هیدرولیکی مندرج در جدول (۲) مشاهده می‌شود که هر چه بافت خاک سنگین‌تر باشد به طور ملموسی به زمان (t_{fc}) و مقدار مکش ماتریک (h_{fc}) بیشتری در نقطه θ_{fc} نیاز است.

ارزیابی توابع انتقالی برآورد رطوبت ظرفیت زراعی

با بررسی نتایج تحلیل‌های آماری برای سه تابع انتقالی شامل *Twarakavi et al.* (2009)، *Rosetta* (2001) و *Dexter* (2004) ملاحظه شد مقادیر $NRMSE$ (۲/۳۱) و SE (۰/۵۱) برای تابع انتقالی *Twarakavi et al.* (2009) با کمترین انحراف نسبت به نتایج مشاهداتی در مقایسه با دو تابع انتقالی دیگر نسبتاً مطلوب‌تر بوده و برآورد دقیق‌تری از میزان θ_{fc} ارائه می‌کند. هر چه مقدار این آماره‌ها کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر برآورد دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت است. به طوری که مقادیر $NRMSE$ زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۲۰-۱۰ درصد دقت مناسب، ۳۰-۲۰ درصد متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است. همچنین، مقدار آماره ME با علامت منفی برای تابع انتقالی *Twarakavi et al.* (2009) نشان داد که با تفاوت بسیار ناچیز و غیرمعنی‌داری نسبت به دو تابع انتقالی دیگر، تنها به میزان اندکی θ_{fc} را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. در تحلیل دقت بالای این تابع انتقالی می‌توان ادعا نمود که در واقع، پارامترهای معادله *Van Genuchten* (1980) به نوعی در برگیرنده همه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاکها می‌باشد. این در حالی است که سایر توابع انتقالی نظیر *Pachepsky and Rawls* (2004) یا *Vereecken et al.* (1989) تنها بر اساس درصد ذرات بافت خاک و یا برخی کمیت‌های شیمیایی نظیر مقدار کربن و مواد آلی بدست آمده و احتمالاً از این درجه دقت برای طیف گسترده‌ای از خاکهای مناطق مختلف برخوردار نیستند. *Minasny et al.* (1999) نیز توابع انتقالی رگرسیون خطی را با وجود عملکرد پایین‌تر نسبت به شبکه عصبی مصنوعی توصیه نمودند.

در این پژوهش نیز، برای تابع انتقالی *Rosetta* (2001) مقادیر ME (۰/۴۲)، $NRMSE$ (۰/۵۲) و SE (۰/۷۱) بدست آمد. بنابراین، ارجحیت مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مانند نرم‌افزار *Rosetta* (2001) که در هر دو روش *Twarakavi et al.* (2009) و *Rosetta* (2001) به کار رفت نسبت به مدل‌های رگرسیونی نظیر روش *Dexter* (2004) در برآورد θ_{fc} و منحنی مشخصه رطوبتی قابل استنتاج است. این برآورد قابل قبول با مدل *Rosetta* (2001) می‌تواند به دلیل وجود ماهیت علمی قوی و محدوده وسیع نمونه خاکهای استفاده شده در مرحله آموزش مدل باشد. در آموزش مدل *Rosetta* (2001) از خاکهای قاره آسیا نیز استفاده شده است (*Borgesien and Schaap*, 2005).

بررسی پژوهشگرانی همچون *Obiero et al.* (2013) و *Minasny et al.* (1999) تأیید نمود که مدل‌های رگرسیونی قادر به برآورد مناسب پارامترهای معادله *Van Genuchten* (1980) نیست زیرا ارتباط خطی بین ویژگی‌های خاک وجود ندارد. همچنین، بخشی از کاهش توان تبیین مدل‌های رگرسیونی پی‌ریزی شده نظیر روش رابطه *Dexter* (2004) را می‌توان به وجود روابط غیرخطی پیچیده بین ویژگی‌های دریافت و زودیافت نسبت داد که مدل‌های رگرسیونی خطی قادر به استخراج این روابط نیستند (*Sy*, 2006). به نحوی که تابع انتقالی *Dexter* (2004) در مقایسه با مدل‌های دیگر پراکندگی بیشتری را نسبت به نتایج مشاهداتی ایجاد نموده و دارای بیشترین مقدار آماره‌های ME (۰/۴۱)، $NRMSE$ (۰/۹۷) و SE (۰/۱۷۵) بود. در معادله کلی برای هر سه نوع خاک، مقدار این آماره‌ها برای تابع *Dexter* (2004) در حالت بهینه زمانی بدست آمد که به میزان ۴/۵ درصد از مقادیر برآوردی برای رطوبت بهینه گاورو شدن (طبق معادله ۳) کسر شد. در جدول (۲) مشاهده می‌شود که در روش *Dexter* (2004)، میزان رطوبت در نقطه عطف منحنی (θ_{inf}) در خاکهای لومی تنها دو درصد بیشتر از θ_{fc} (جدول ۱) بود. در حالی که این تفاوت در خاکهای سبک‌تر مانند لومی شنی و شنی لومی تقریباً به ۶/۵ درصد رسید. رطوبت بهینه گاورو شدن به اعتقاد *Pachepsky and Rawls* (2004) تنها حدود دو الی سه درصد از θ_{fc} خاک بیشتر است.

افزون بر آن، بررسی آماره‌های میانگین هندسی نسبت خطا (*GMER*) و انحراف معیار هندسی خطا (*GSDER*) نیز این نتایج را تأیید نمود. لیکن به دلیل عدم تفاوت آشکار و ملموس در ارزیابی توابع انتقالی ارائه نشده‌اند. بررسی مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز در نقطه θ_{fc} در جدول (۲) بیانگر آن است که مقدار k_{fc} در خاک لومی ۰/۰۹۴ سانتی‌متر در روز، حاصل میانگین شرایط مزرعه و مدل فیزیکی است که به

پیشنهاد است. در این پژوهش، به وضوح اثر تراکم خاک (جرم مخصوص ظاهری بیشتر) و تنوع بافتی با میزان شن، سیلت و رس متفاوت بر میزان θ_{fc} معنی‌دار بود. به طوری که مطابق جدول (۳)، نتایج آزمون F با آنالیز واریانس یک طرفه مشخص نمود که چهار عامل فیزیکی زود یافت خاک شامل جرم مخصوص ظاهری و میزان شن، سیلت و رس در سطح 0.05 تأثیر معنی‌داری بر ظرفیت نگهداری آب در خاک دارند.

مقدار پیشنهادی (0.1) توسط Twarakavi *et al.* (2009) بسیار نزدیک است. بدین ترتیب، مطابق نظر Meyer and Gee (1999) به نظر می‌رسد که افزایش مقدار k_{fc} ناشی از سبکتر شدن بافت خاک نظیر لومی شنی و شنی لومی حکایت از این دارد که احتمالاً مقدار k_{fc} در خاک خیلی سبک (شنی) به 0.1 سانتی‌متر در روز و بر عکس، در خاکهای سنگین رسی به 0.001 سانتی‌متر در روز نزدیک شود. لذا، ادامه پژوهش حاضر با انجام آزمایش‌های گسترده‌تر برای خاکهای شنی و رسی قابل

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاکهای منطقه مورد مطالعه

بافت خاک	ذرات (درصد)			جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	رطوبت اشباع (درصدحجمی)	رطوبت ظرفیت زراعی (درصدحجمی)
	رس	سیلت	شن			
لومی	۲۰	۴۲	۳۸	۱/۵۳	۳۹/۳	۲۵/۴
	۱۷	۴۳	۴۰	۱/۶۵	۳۵/۱	۲۲/۵
لومی شنی	۱۰	۳۰	۶۰	۱/۵۴	۴۰/۸	۲۱/۹
	۱۲	۲۹	۵۹	۱/۴۵	۴۲/۰	۲۲/۴
شنی لومی	۸	۱۳	۷۹	۱/۵۵	۳۸/۰	۱۸/۶
	۷	۱۲	۸۱	۱/۷۰	۳۴/۵	۱۷/۰

جدول ۲- پارامترهای معادله Van Genuchten (1980) و برخی مشخصات هیدرولیکی خاکهای منطقه مورد مطالعه

n	α	θ_r	k_s	k_{fc}	l_{fc}	h_{fc}	θ_{inf}	بافت خاک
۱/۳۹۱	۰/۰۱۱	۵/۰	۶/۵	۰/۰۱۱۱	۵۵	۳۴۰	۲۷/۴	مدل فیزیکی
۱/۳۷۹	۰/۰۱۲	۴/۸	۵/۹	۰/۰۰۷۷	۶۶	۳۶۰	۲۴/۷	مزرعه آزمایشی
۱/۴۰	۰/۰۲۶۳	۴/۰	۳۸/۵	۰/۰۱۴۸	۴۴	۲۱۸	۲۷/۹	مدل فیزیکی
۱/۴۱	۰/۰۲۵۹	۴/۲	۴۳/۴	۰/۰۱۷۸	۴۰	۲۱۶	۲۸/۷	مزرعه آزمایشی
۱/۴۶۲	۰/۰۴۲۵	۳/۲	۸۹/۱	۰/۰۳۶۰	۱۹	۱۳۰	۲۵/۴	مدل فیزیکی
۱/۴۴۶	۰/۰۴۳۱	۳/۰	۷۰/۱	۰/۰۲۴۲	۲۲	۱۳۶	۲۳/۲	مزرعه آزمایشی

واحد متغیرها شامل: میزان رطوبت خاک در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (θ_{inf}) و رطوبت باقی‌مانده در خاک (θ_r) به درصد حجمی، مکش خاک در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی (h_{fc}) به سانتیمتر، زمان رسیدن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی (l_{fc}) به ساعت، هدایت هیدرولیکی در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی (k_{fc}) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به سانتیمتر در روز، عکس مکش خاک در نقطه ورود هوا (α) به معکوس سانتیمتر، شاخص توزیع اندازه منافذ خاک (n) بی بعد.

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری عوامل زود یافت خاک

عامل	آنالیز واریانس یک طرفه
جرم مخصوص ظاهری	$F_{(1,17), 0.05} = 4/45 < 5/97$ ؛ Sig. = ۰/۰۲۷
رس	$F_{(1,17), 0.05} = 4/45 < 67/9$ ؛ Sig. = ۰
سیلت	$F_{(1,17), 0.05} = 4/45 < 88/8$ ؛ Sig. = ۰
شن	$F_{(1,17), 0.05} = 4/45 < 98/7$ ؛ Sig. = ۰

خاک و تلفات نفوذ عمقی داشت. این تأثیر منفی همچون پژوهش Rawls and Pachepsky (2002) و Merdun *et al.* (2006) به طور کاملاً معنی‌داری مشاهده شد. از سوی دیگر، افزایش مقدار رس نسبت به ذرات سیلت و شن دارای اثری مثبت بر میزان گنجایش θ_{fc} خاکها داشته و با نتایج Epebinue

در این نتایج، همبستگی منفی معنی‌داری بین درصد ذرات شن و میزان θ_{fc} آشکار شد (Epebinue and Nwadialo, 1994). در واقع، تخلیه سریع آب در خاکهای شنی به علت خلل و فرج بزرگ‌تری که تنها برای تهویه مناسب‌اند به همراه سطح ویژه کم ذرات شن باعث اثرات منفی زیادی در ظرفیت نگهداری آب

تجربی متکی بر اصول فیزیکی که در سطح مزرعه نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند می‌توانند مانند روش پیشنهادی Twarakavi *et al.* (2009) جایگزینی مناسب برای روشهای سنتی تخمین ظرفیت نگهداری آب در خاک باشند. لذا، به مهندسان مشاور توصیه می‌شود برای تخمین میزان ظرفیت نگهداری آب در مزرعه در مطالعات کارشناسی و برنامه‌ریزی آبیاری از این توابع انتقالی به ویژه معادله Twarakavi *et al.* (2009) استفاده کنند. همچنین در پایان به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به یک مدل جامع ریاضی متشکل از عوامل مهم فیزیکی زودیاقت مانند بافت خاک و برخی مشخصات هیدرولیکی نظیر هدایت هیدرولیکی به عنوان مهمترین متغیرهای مستقل مؤثر بر میزان ظرفیت نگهداری آب در خاک، با استفاده از مدل‌سازی و آزمایش‌های گسترده‌تر جهت بهبود تابع انتقالی یاد شده به معادله‌ای مشابه با ضریب خاص خاکهای استان خوزستان دست یابند.

REFERENCES

- Baker, L. and Ellison, D. (2008). Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, 144(1-2), 212-224.
- Borgesen, C. D. and Schaap, M. G. (2005). Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma*, 127, 154-167.
- Bouma, J. (1990). Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils. *Geoderma*, 46, 3-13.
- Briggs, L. J. and McLane, J. W. (1990). Moisture equivalent determinations and their application. In: *Proceedings of American Society of Agronomy*, 2, 138-147.
- Calciu, I., Simota, C., Vizitiu, O. and Pănoiu, I. (2011). Modelling of soil water retention properties for soil physical quality assessment. *Research Journal of Agricultural Science*, 43(3), 35-43.
- Cazemier, D. R., Lagacherie, P. and Clouaire, R. M. (2001). A possibility theory approach for estimating available water capacity from imprecise Information contained in soil data bases. *Geoderma*, 103(1-2), 113-132.
- Cong, Z. T., Lu, H. F. and Ni, G. H. (2014). A simplified dynamic method for field capacity estimation and its parameter analysis. *Water Science and Engineering*, 7(4), 351-362.
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B. and Ginn, T. R. (1984). A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20 (6), 682-690.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Epebinue, O. and Nwadialo, B. (1994). Predicting soil water availability from texture and organic matter content for Nigerian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24, 633-640.
- Hall, D. G., Reeve, M. J., Tomasson, A. J. and Wright, V. F. (1977). Water retention, porosity and density of field soils. *Technical Monograph No. 9. Soil Survey of England and Wales*, Harpenden.
- Hart, G. L. and Lowery, G. (1998). Measuring instantaneous solute flux and loading with time domain reflectometry. *Soil Science Society American Journal*, 62, 23-35.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, CA.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and mineralogical properties* (2th ed.). Agronomy, vol. 9, American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison, WI.
- McKenzie, N. J. and MacLeod, D. A. (1989). Relationships between soil morphology and soil properties relevant to irrigated and dryland agriculture. *Australia Journal of Soil Resources*, 27, 235-258.
- 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 Resources*, 90, 108-116.
- Meyer, P. D. and Gee, G. (1999). Flux-based estimation of field capacity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(7), 595-599.
- Minasny, B., McBratney, A. B. and Bristow, K. L. (2002) Rawls and Pachepsky, و (1994) and Nwadialo, مطابقت دارد. در واقع، وجود ذرات رس به دلیل ایجاد خلل و فرج ریزتر که مناسب برای نگهداری آب هستند به علت سطح ویژه بیشتر، اثربخشی بیشتری پیدا می‌کند. در پژوهش‌های دیگری نظیر Raghavendra *et al.* (2001) و (2007) نیز نشان داده شد که درصد رس موجود در بافت خاک از مهمترین عوامل مؤثر بر θ_{fc} خاکها می‌باشد. همچنین، نتایج پژوهش Obiero *et al.* (2013) و Merdun *et al.* (2006) تأیید نمود افزایش جرم مخصوص ظاهری حاکی از تراکم بیشتر خاک و از بین رفتن فضای خلل و فرج است که منجر به کاهش معنی‌دار ظرفیت نگهداری آب در خاک شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به طور کلی، نتایج این پژوهش در ارزیابی عملکرد چندین تابع انتقالی نقطه‌ای معروف برای برآورد میزان θ_{fc} در خاکهای مناطق مختلف استان خوزستان نشان داد که مدل‌های نیمه

- (1999). Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93, 225-253.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Nachabe, M. H. (1998). Refining the definition of field capacity in the literature. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4), 230-232.
- Novák, V. and Havrila, J. (2006). Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants. *Biologia*, Bratislava, 61/Suppl. 19, 289-293.
- Obiero, J. P. O., Gumbe, O. L., Omuto, C. T., Hassan, M. A. and Agullo, J. O. (2013). Development of Pedotransfer Functions for Saturated Hydraulic Conductivity. *Open Journal of Modern Hydrology*, 3, 154-164.
- Pachepsky, Ya. A. and Rawls, W. J. (2004). Development of pedotransfer functions in soil hydrology, *Developments in Soil Science*. vol. 30. Elsevier, Amsterdam.
- Raghavendra, B. J., Mohanty, B. P. and Springer, E. P. (2007). Multiscale pedotransfer function for soil water retention. *Vadose Zone*, 6, 868-878.
- Ratliff, L. F., Ritchie, J. T. and D. K. Cassel. (1983). Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Science Society American Journal*, 47, 770-775.
- Rawls, W. J. and Brakensiek, D. L. (1985). Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E., Ward, T.J. (Eds.), *Watershed Manage, Eighties., Proceedings of the Symposium of ASCE*, Denver, CO, New York.
- Robbins, C. W. and Wiegand, C. L. (1990). Field and laboratory measurements. In Tanji, K. K. Ed. *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE, New York, NY. 201-219.
- Romano, N. and Santini, A. (2002). *Field, in Methods of Soil Analysis. Part 4, Physical Methods*, Soil Science Society American Book Series. (vol. 5). Edited by Dane, J. H. and Topp, G. C. (pp. 721-738). Madison, Wisconsin. USA.
- Saxton, K. E. and Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society American Journal*, 70, 1569-1578.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. and Van Genuchten, M. Th. (2001). ROSETTA: A computer program forestimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Schaap, M. G., Nemes, A., and Van Genuchten, M. Th. (2004). Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. *Vadose Zone*, 3, 1455-1463.
- Simunek, J., Van Genuchten, M. Th. and Sejna, M. (2005). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 3.0, HYDRUS Software Series 1. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside. Riverside. CA. 270p.
- Sy, N. L. (2006). Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrology Science*, 51(1), 3-20.
- Teixeira, W. G., Ceddia, M. B., Ottoni, M. V. and Donnagema, G. K. (eds.). (2014). *Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration*. Springer Press.
- Tessier, D., Bigorre, F. and Bruand, A. (1999). La capacité d'échange : outil de prévision des propriétés physiques des sols. *Comptes Rendus de l'Academie d'Agriculture de France*, 85, 37-46.
- Twarakavi, N. K. C., Simunek, J. and Schaap, M. (2009). Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. *Soil Science Society American Journal*, 73, 1443-1452.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44, 892-898.
- Van Genuchten, M. T., Leij, F. J. and Yates, S. R. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. EPA Report, 600/2-91/065, USA Salinity Laboratory, USDA.
- Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. (1931). The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, 32, 181-193.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148, 389-403.
- 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*, 9, 795-820.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A. and LeBas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, 169-185.