

تخمین منحنی رطوبتی تعدادی از خاک‌های شور و شور و سدیمی با استفاده از توابع انتقالی

ناصر خالق‌پناه^{1*}، مهدی شرفا و سعداله تیموری

دانشجوی دکتری مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران؛ Nkhaleghpanah@ut.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران؛ M_shorafa@ut.ac.ir

کارشناس ارشد پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج؛ Steimouri@nrcam.org

چکیده

حدود 20 میلیون هکتار از اراضی کشورمان را خاک‌های مبتلا به نمک تشکیل می‌دهد. هدف از این تحقیق اشتقاق توابع انتقالی تعدادی از خاک‌های مبتلا به نمک جهت پیش‌بینی پارامترهای معادله وان‌گنوختن و رطوبت در مکش‌های مختلف با استفاده از خصوصیات زودیافت خاک بود. به همین منظور 68 نمونه خاک از خاک‌های جنوب تهران انتخاب گردید (خاک‌های شور و شور و سدیمی). منحنی رطوبتی خاک‌ها در پتانسیل‌های ماتریک صفر، 10، 33، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلو پاسکال تعیین شدند. فراوانی نسبی ذرات خاک، جرم ویژه ظاهری، کربنات کلسیم، کربن آلی، EC و SAR اندازه‌گیری شده و پارامترهای معادله وان‌گنوختن نیز با استفاده از نرم‌افزار RETC بدست آمد. همچنین کارایی توابع بدست آمده در تخمین منحنی رطوبتی با تعدادی از توابعی که قبلاً توسط محققین مختلف ارائه شده بود (13 تابع) مقایسه گردید. بطور کلی یافته‌های این پژوهش نشان داد: 1- با استفاده از توابع انتقالی می‌توان نقاط مختلف منحنی رطوبتی خاک و پارامترهای معادله وان‌گنوختن را به میزان قابل‌قبولی تخمین زد (در توابع نقطه‌ای: $0/577 \geq R^2_{Adj} \geq 0/844$ و $0/0296 \leq RMSE(cm^3/cm^3) \leq 0/0121$). 2- نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که حساسیت اکثر توابع نقطه‌ای به تغییرات جرم مخصوص ظاهری بیشتر از بقیه متغیرها بوده و نسبت رس به سیلت، EC و شن در مراتب بعدی قرار می‌گیرند. 3- با توجه به ضریب پارامتر EC در معادلات و با توجه به ضرایب همبستگی جزئی و نتایج آنالیز حساسیت، مقادیر بالای پارامتر EC می‌تواند تا حدودی توزیع اندازه منافذ و نهایتاً شکل منحنی رطوبتی را بواسطه انبساط و انقباض تغییر داده و این تغییرات را می‌توان با وارد کردن متغیرهای EC و SAR در ایجاد توابع، تا حدودی لحاظ کرد. 4- مقایسه توابع قبلی ارائه‌شده و توابع بدست آمده نشان می‌دهد که توابع بدست آمده در این تحقیق، بهترین توابع در تخمین منحنی رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، پارامترهای معادله وان‌گنوختن، منحنی رطوبتی خاک، خاک‌های شور، خاک‌های شور و سدیمی

مقدمه

شور و شور و سدیمی تشکیل می‌دهند که بخاطر محدودیت شوری و سدیمی بودن رها شده و به زمین‌های بایر و یا به محلی برای تخلیه زباله تبدیل شده‌اند. گزارشات نشان می‌دهد که در کشور ما حدود 20 میلیون

یکی از مهمترین مسائل در قرن حاضر مسئله تغذیه است. با توجه به افزایش روزافزون جمعیت نیاز به افزایش مواد غذایی امری ضروری به نظر می‌رسد. سطح وسیعی از زمین‌های موجود در سراسر دنیا را خاک‌های

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، گروه مهندسی

تخمین پارامتریک و نقطه‌ای را مورد بررسی قرار داده و نشان‌دادند توابع نقطه‌ای نتایج بهتری نسبت به توابع پارامتریک ارائه می‌دهند. موگابی (2004) مقادیر رطوبت 41 نمونه خاک را در سه پتانسیل (60-، 270- و 1430- کیلوپاسکال) با استفاده از متغیرهای رس، سیلت، شن، ماده آلی و جرم ویژه ظاهری تخمین زد. نتایج، وجود ارتباط معنی‌دار بین مقادیر رطوبت با مقادیر رس، شن و ماده آلی را نشان داده و پیش‌بینی‌ها از طریق افزایش تعداد پارامترهای ورودی مدل‌ها بهبود پیدا کرد. در کشور ایران نیز تحقیقاتی در زمینه اشتقاق توابع انتقالی بر روی خاک‌های آهکی، گچی و... در تعدادی از مناطق صورت گرفته، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه کاملاً احساس می‌شود. خداوردیلو و همایی (2004) یک سری توابع نقطه‌ای برای خاک‌های آهکی کرج بدست آوردند. نتایج نشان داد که متغیر کربنات کلسیم به عنوان پارامتر ورودی توابع می‌تواند به میزان قابل توجهی موجب بهبود توابع و همبستگی بهتر مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر تخمینی شود.

در اینجا ذکر یک نکته ضروری است و آن اینکه منحنی رطوبتی خاک رابطه بین رطوبت و پتانسیل ماتریک خاک می‌باشد. از طرفی دو متغیر EC و SAR به ترتیب غلظت محلول خاک و نسبت کاتیون‌های سدیم به کلسیم و منیزیم موجود در آن را مشخص می‌کنند. لذا نمی‌توان گفت که این دو متغیر بطور مستقیم بر روی منحنی رطوبتی تأثیر دارند. روسو و برسلر (1977 و 1980) که تأثیرات سدیم تبادلی و غلظت محلول خاک را بر روی خصوصیات هیدرولیکی بررسی کردند اظهار داشتند برای سیستم‌های Na-Ca خصوصیات هیدرولیکی خاک بستگی زیادی به ترکیب و غلظت محلول خاک دارد. مشاهده خاک‌های منطقه مورد مطالعه در زمان اشباع‌شدن و از دست دادن رطوبت نشان داد که قسمت اعظم این خاک‌ها در زمان تر و خشک‌شدن دارای خاصیت انبساط و انقباض بوده که این خاصیت از مقادیر کم در خاک‌های شور تا مقادیر بسیار زیاد در خاک‌های شور و سدیمی نوسان داشت. زمانیکه EC پایین و SAR بالا باشد ذرات خاک دیسپرس خواهند شد. اما بالارفتن EC از یک حد آستانه مانع از دیسپرس شدن ذرات خواهد گردید. بدلیل همبستگی مثبت بین EC و SAR در خاک‌های مورد مطالعه و با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، به نظر می‌رسد که انبساط و انقباض یکی از مهمترین عوامل تغییر خصوصیات هیدرولیکی در این خاک‌ها بوده باشد. رویز و همکاران (2005) نشان داده‌اند زمانیکه SAR افزایش پیدا کرده و خاک منبسط می‌گردد، این انبساط

هکتر از اراضی مستعد کشاورزی به درجات مختلف متأثر از املاح محلول می‌باشند. از لحاظ افزایش سطح زیر کشت بعضی از این خاک‌ها که با زهکشی و یا تدابیر مهندسی امکان اصلاح آنها وجود دارد مورد توجه خاص قرار گرفته است. جهت تحقق این اهداف، احساس نیاز به تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله منحنی رطوبتی آن می‌شود. منحنی رطوبتی خاک یکی از خصوصیات مهم خاک است که وابستگی مقدار آب خاک را با پتانسیل ماتریک آن توصیف می‌کند. این وابستگی معمولاً از طریق معادلات تحلیلی با تعداد کمی متغیر نشان داده می‌شود (توماسلا و همکاران، 2003). نمونه‌برداری مستقیم همراه با اندازه‌گیری‌های مستقیم آزمایشگاهی یا صحرایی معمولاً بسیار پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد. از این رو، تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا روابط ممکن بین منحنی رطوبتی با خصوصیات دیگر خاک مثل توزیع اندازه ذرات، میزان ماده آلی، وزن مخصوص ظاهری که در اکثر مطالعات خاکشناسی اندازه‌گیری شده و تعیین آنها ساده می‌باشد را تعیین کرده و خصوصیات هیدرولیکی را بوسیله این خصوصیات زودیافت تخمین بزنند (راجکای و همکاران، 2004). این راهکار به عنوان توابع انتقالی¹ (PTFs) شناخته شده که توسط بوما ارائه شده است (بوما، 1989). توابع انتقالی به دو دسته کلاسی و پیوسته تقسیم می‌شوند (وان آلفن و همکاران، 2001). توابع انتقالی کلاسی و پیوسته را نیز می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: 1- توابع انتقالی نقطه‌ای 2- توابع انتقالی پارامتریک 3- مدل‌های فیزیکی-تجربی. توابع انتقالی نقطه‌ای مقادیر آب را در پتانسیل‌های ماتریک مشخص با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه² (گوپتا و لارسن، 1979) یا شبکه عصبی مصنوعی³ (پاچپسکی همکاران، 1996) تخمین می‌زند. با توابع پارامتریک می‌توان پارامترهای ناشناخته معادلات منحنی رطوبتی را به ویژگی‌هایی چند از خاک ارتباط داد (گوپتا و لارسن، 1979). توابع منحنی رطوبتی تجربی زیادی برای این هدف در دسترس می‌باشد مثل وان-گنوختن (1980). در کشورهای مختلف جهان تلاش‌های زیادی جهت اشتقاق توابع انتقالی هیدرولیکی صورت گرفته است (وستن و همکاران، 1999). ویریکین و همکاران (1989) پارامترهای معادله وان گنوختن (با شکل - های مختلف آن) را با استفاده از خصوصیات پایه‌ای خاک بر روی 182 منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده تخمین زدند. توماسلا و همکاران (2003) کارایی دو روش

1. Pedotransfer Functions

2. Multiple linear regression

3. Artificial neural network

جرم ویژه ظاهری نمونه‌های انتخاب‌شده نیز به ترتیب با روش‌های واکلی- بلاک، کلسیمتری (اسپارکس و همکاران، 1996) و روش کلوخه (کارتز و گریگوریچ، 2008) تعیین شدند. برای تعیین منحنی رطوبتی، رطوبت خاک در پتانسیل‌های صفر، -10، -33، -100، -300، -500، -1000 و -1500 کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد (کارتز و گریگوریچ، 2008). پارامترهای معادله وان‌گنوختن با در نظر گرفتن $m=1-1/n$ بوسیله برنامه کامپیوتری RETC تعیین شدند. این برنامه معادله منحنی رطوبتی را به داده‌ها برازش داده و با استفاده از یک روش بهینه‌سازی پارامتر، به صورت غیرخطی و با حداقل مربعات خطا، ضرایب ناشناخته در معادله را برآورد می‌کند (وان گنوختن و همکاران، 1991). معادله وان‌گنوختن به صورت زیر می‌باشد:

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

در این معادله زیرنویسهای s و r به ترتیب نشانگر مقادیر رطوبت‌های باقیمانده و اشباع و n و α پارامترهای تجربی هستند که شکل منحنی رطوبتی را مشخص می‌کنند (وان گنوختن، 1980). از روش رگرسیون گام‌به‌گام با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS برای گزینش مناسبترین ترکیب از متغیرهای مستقل برای برآورد متغیرهای وابسته استفاده شد. سپس خطای برآوردها مورد آزمون نرمالیتی قرار گرفته و در صورت نرمال نبودن تبدیلات لازم بر روی متغیرهای وابسته صورت گرفت. در ضمن باید توجه کرد که اگر بین متغیرهای مستقل وارد شده به توابع، وابستگی خطی قوی مشاهده شود، همراستایی چندگانه بوجود می‌آید (رضایی و سلطانی، 1382). در خاک‌های مورد مطالعه بین رس و سیلت با شن همبستگی بالایی وجود داشت، لذا در توابعی که این دو متغیر همراستا وارد مدل می‌شدند بجای یکی از آنها از نسبت رس به سیلت استفاده گردید. کارایی توابع نقطه‌ای و پارامتریک بدست آمده در پیش‌بینی منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده برای خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای آماری R^2_{Adj} ، $RMSE^1$ و GMR^2 مورد ارزیابی قرار گرفت که به صورت زیر محاسبه می‌شوند (y_i مقدار اندازه‌گیری شده، \hat{y}_i مقدار پیش‌بینی شده و N تعداد کل نمونه‌ها):

سبب کاهش تخلخل درشت و افزایش تخلخل کل می‌شود. در نتیجه، این خاک‌ها در یک پتانسیل ماتریک مشخص، مقدار رطوبت بیشتری نسبت به خاک‌های غیر قابل انبساط و یا خاک‌های با $SAR=0$ نگهداری خواهند کرد. لیما و همکاران (1990) نیز تأثیر شوری را بر روی خصوصیات هیدرولیکی، بررسی کرده و نشان داده‌اند که دو پارامتر EC و SAR بر روی منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله وان‌گنوختن مؤثر خواهد بود.

نهایتاً نتیجه می‌گیریم چون تغییرات EC و SAR روی منحنی رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه تأثیر قابل توجهی داشته و منابع علمی هم آنرا تأیید می‌کنند، از اینرو این پارامترها به متغیرهای مستقل ورودی برآوردکننده مکشهای مختلف و پارامترهای معادله وان‌گنوختن اضافه گردید. به طور کلی اهداف این پژوهش عبارتند از: 1- تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف و پارامترهای معادله وان‌گنوختن با استفاده از توابع انتقالی. 2- تأثیر دو متغیر EC و SAR بر روی معادلات تخمین منحنی رطوبتی و پارامترهای آن با توجه به انبساط و انقباض این خاک‌ها. 3- ارزیابی سایر توابع انتقالی بدست آمده (13 تابع) و مقایسه نتایج برآورد آنها با نتایج برآورد توابع بدست آمده برای خاک‌های مورد مطالعه

مواد و روشها

اراضی مطالعه‌شده در قسمت جنوب تهران قرار داشته، بخشی از این اراضی بایر و یا به محلی برای تخلیه زباله‌های شهری و صنعتی تبدیل شده‌است. در اراضی پست معمولاً شوری و قلیائیت خاک زیاد تا خیلی زیاد بوده و زهکشی این اراضی نیز نامناسب می‌باشد (بی‌نام، 1361). از قسمتهای مرکزی، جنوبی، شرقی و غربی اراضی جنوب تهران که قابلیت هدایت الکتریکی آنها مساوی یا بالاتر از 4 دسی‌زیمنس بر متر بود نمونه‌برداری صورت گرفت. به دلیل موقعیت منطقه و شرایط آن، نمونه‌برداری از عمق 30 سانتیمتری و به صورت تصادفی انجام شد. از منطقه مورد مطالعه تعداد 80 مکان انتخاب شده و از هر مکان تعدادی کلوخه برای تعیین جرم ویژه ظاهری برداشته شد. ابتدا فراوانی نسبی ذرات خاک با روش هیدرومتری (کارتز و گریگوریچ، 2008)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (ECe) بوسیله هدایت سنج الکتریکی و نسبت جذب سدیم (SAR) نمونه‌ها تعیین شدند (اسپارکس و همکاران، 1996). بر اساس این اطلاعات و به دلیل مشابه بودن خصوصیات تعدادی از خاک‌ها، 68 نمونه خاک از نمونه‌های برداشت‌شده بر اساس درجه شوری یا سدیمی بودن، برای آزمایشات بعدی انتخاب گردیدند. سپس کربن آلی، کربنات کلسیم و

1. Root Mean Square Error

2. Geometric Mean Error Ratio

نتایج و بحث

توابع انتقالی بدست آمده برای خاکهای مورد مطالعه

دامنه تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول 1 آمده است. خاک‌ها از دو گروه میان‌بافت شامل لوم‌شنی، لوم‌سیلتی و سنگین-بافت شامل لوم‌رسی، لوم‌رسی‌سیلتی و رسی‌سیلتی تشکیل شده بودند. توابع با استفاده از متغیرهای مستقل فراوانی نسبی ذرات، جرم ویژه ظاهری، درصد کربنات کلسیم، درصد کربن آلی، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و نسبت جذب سدیم در عصاره اشباع خاک ایجاد گردیدند. جهت ایجاد روابط بهتر یا نرمال‌نبودن توزیع خطای برآوردها تبدیلات زیر بر روی تعدادی از پارامترها صورت گرفت:

$$\theta_{10}^* = 1/(\theta_{10})^{0.3} \quad \theta_r^* = (\theta_r)^{0.8} \quad \alpha^* = 1/\alpha \quad (7)$$

$$\theta_{100}^* = (\theta_{100})^2 \quad \theta_s^* = (\theta_s)^{2.5} \quad n^* = 1/\log(n+0.1)$$

توابع نقطه‌ای شامل توابع بدست‌آمده برای تخمین رطوبت خاک در مکش‌های مختلف بوده و توابع پارامتریک، توابع بدست‌آمده برای پارامترهای معادله وان‌گنوختن شامل θ_r ، θ_s ، α و n می‌باشد. ضرایب هر کدام از اجزای این توابع در جدول 2 آمده است. در این خاک‌ها برای ایجاد توابع انتقالی از بین دو پارامتر EC و SAR از پارامتر SAR به عنوان متغیر مستقل ورودی به مدل‌ها استفاده شد. سپس از متغیر مستقل EC بعنوان ورودی مدل‌ها استفاده شد که منجر به ضرایب تبیین بالاتر با خطای کمتری شد، لذا در برآورد متغیرهای وابسته از پارامتر EC استفاده شد. اگرچه EC در این مدل‌ها وارد شده است اما چون با SAR همبستگی بالایی داشته، لذا به طور غیرمستقیم تأثیر این دو پارامتر در نظر گرفته شده است. بررسی توابع بدست‌آمده در جدول 2 نشان می‌دهد که این توابع در سطح 0/1 درصد (جدول 3) معنی‌دار می‌باشند. به دلیل قابلیت انبساط و انقباض خاک‌های مورد مطالعه که از مقادیر کم در خاک‌های شور تا مقادیر بسیار زیاد در خاک‌های شور و سدیمی نوسان داشته و بواسطه وجود املاح محلول کم تا بسیار زیاد در این خاک‌ها و تأثیر این املاح بر اندازه منافذ، توزیع اندازه منافذ و نهایتاً شکل منحنی رطوبتی تغییر کرده و به همین دلیل پارامتر EC در اکثر معادلات به عنوان یکی از پارامترهای برآوردکننده متغیر وابسته وارد معادلات شده و همبستگی بالایی با پارامتر برآورد شده دارد (ضرایب همبستگی جزئی (جدول 4) نیز موید

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$GMER = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{\hat{y}_i}{y_i} \right)}{N} \right] \quad (3)$$

حساسیت هر کدام از توابع بدست‌آمده نسبت به پارامترهای ورودی توسط شاخص حساسیت تحلیل گردید:

$$Sensitivity\ Index\ (SI) = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy}{dx} \times \frac{x}{y} \quad (4)$$

که در نهایت معادله به شکل زیر در می‌آید:

$$SI = A_i \frac{x_i}{y} \quad (5)$$

که A_i ضریب متغیر x_i بوده و y مقدار تابع بدست‌آمده به ازای Ax_i می‌باشد (با ثابت بودن سایر ورودیهای مدل). نتایج تحلیل حساسیت مدل مشخص می‌کند که خروجی مدل تا چه اندازه تحت تأثیر هر کدام از ورودیهای مدل بوده و به ازای تغییر یک واحد در هر کدام از ورودیها خروجی مدل چه مقدار تغییر خواهد کرد. به منظور تحلیل حساسیت، یکی از داده‌های ورودی به هر کدام از توابع تغییر و سایر ورودیهای مدل ثابت نگه داشته شد (چاترجی و هادی، 1988؛ مورگان، 2005). همچنین جهت ارزیابی توابع نقطه‌ای و پارامتریک بدست‌آمده و مقایسه آن با سایر توابع بدست‌آمده توسط دیگر محققین (جدول 6) در پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاکهای مورد مطالعه از سه پارامتر آماری RMSE، GMER و AIC که برای کل منحنی رطوبتی محاسبه شد، استفاده گردید که AIC¹ به شکل زیر محاسبه می‌گردد (k تعداد ورودیهای توابع است):

$$AIC = N \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \right] + 2k \quad (6)$$

مقادیر GMER نشان‌دهنده میزان تطبیق مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بوده که مقادیر کمتر و بیشتر از یک این پارامتر بیانگر این است که تابع مربوطه داده‌ها را به ترتیب، برآورد کم و برآورد زیاد تخمین می‌زند (واگنر و همکاران، 2001) و مقادیر کمتر (یا منفی‌تر) شاخص AIC نشان‌دهنده بهتر بودن تابع می‌باشد.

¹ Akaike's information criterion

در مورد توابع انتقالی پارامتریک نیز باید گفت که با توجه به جداول آنالیز حساسیت و همبستگی جزئی، جرم ویژه ظاهری به دلیل ارتباط این پارامتر با تخلخل کل مهمترین پارامتر برآوردکننده رطوبت اشباع باشند. θ_r رابطه مثبت و معنی‌داری با فراوانی نسبی رس داشته است. ویریکین و همکاران (1989) نیز رابطه مثبت و معنی‌داری بین θ_r با مقدار رس بدست آورده‌اند. با افزایش مقدار رس، رطوبت باقیمانده نیز افزایش یافته که این خود مربوط به اثر سطح ویژه خاک بر مقدار رطوبت باقیمانده می‌باشد. در پارامتر α نیز EC تنها پارامتر وارد شده به معادله بوده و نشان دهنده تأثیر این پارامتر می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت در مورد دو پارامتر برآورده شده θ_r و α نیز مؤید مطالب ذکر شده می‌باشد. در مورد توابع انتقالی پارامتریک ذکر این نکته ضروری است که با توجه به پارامترهای آماری جدول 3 کارایی آنها نسبت به توابع انتقالی نقطه‌ای پایین است. همچنین شکل 2 نیز نشان‌دهنده برآورد بهتر توابع نقطه‌ای نسبت به توابع پارامتریک است (توماسلا و همکاران، 2003). علت کمتر بودن کارایی توابع پارامتریک (علی‌رغم منطبق بودن مقادیر بدست آمده با توابع پارامتریک و مقادیر برازش شده با نرم افزار RETC) نسبت به توابع نقطه‌ای این است که: 1- این پارامترها خود توسط نرم‌افزار RETC برآورد شده‌اند و برآورد دوباره آنها با استفاده از توابع پارامتریک بدون خطا نخواهد بود. 2- منحنی رطوبتی خاک در محدوده‌های مختلفی از پتانسیل ماتریک توسط خصوصیات پایه‌ای مختلفی از خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد (ویسر، 1969). 3- پارامترهای بدست آمده از برازش دادن (فیت کردن) معادلات منحنی رطوبتی با داده‌های اندازه‌گیری شده بدست می‌آید که منجر به کاهش قابلیت اطمینان آنها بخاطر همبستگی ذاتی بین این ضرایب یا بخاطر توزیع ناهمگون سطوح پتانسیل آب خاک می‌باشد (اسکینوست و همکاران، 1997؛ ویریکین و همکاران، 1989). 4- در نرم افزار RETC تأثیر پارامترهای EC و SAR بخصوص مقادیر بالاتر این پارامترها بر روی اندازه منافذ در خاک‌های قابل انبساط و انقباض در نظر گرفته نشده است.

هیلال (2004) نشان داده که شوری به طور غیر مستقیم ممکن است رشد گیاه را از طریق تغییر خصوصیات خاک از جمله تورم، تخلخل، نگهداری آب و نفوذپذیری تحت تأثیر قرار دهد. در حقیقت، آب آبیاری با مقادیر SAR بالا می‌تواند سبب پراکندگی و انبساط ذرات رس موجود در لایه سطحی خاک شده که ساختمان

این موضوع است). ضرایب پارامتر EC در جدول 2 نیز نشان می‌دهد که در خاک‌هایی با EC پایین، تأثیر پارامتر EC در برآورد نقاط مختلف منحنی رطوبتی به دلیل انبساط و انقباض کم این خاک‌ها ناچیز بوده ولی با افزایش مقادیر EC در خاک‌ها این تأثیر افزایش خواهد یافت. نتایج آنالیز حساسیت نیز نشان می‌دهد که حساسیت اکثر توابع نقطه‌ای به تغییرات جرم مخصوص ظاهری بیشتر از بقیه پارامترها بوده و نسبت رس به سیلت، EC و شن در مراتب بعدی قرار می‌گیرند. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین شاخص حساسیت نشان می‌دهد حساسیت اکثر توابع نقطه‌ای به تغییرات پارامتر EC (با توجه به نزدیک بودن مقادیر آن به مقادیر مربوط به نسبت رس به سیلت و مقدار شن) حائز اهمیت می‌باشد (جدول 5).

θ_{10}^* با EC رابطه منفی دارد. به دلیل تبدیل معکوس جهت نرمال‌شدن خطاهای برآوردها، θ_{10} با EC رابطه مثبت خواهد داشت. بر طبق جدول 2 مشاهده می‌شود که θ_{10} تا θ_{1500} کیلوپاسکال با فراوانی نسبی شن رابطه منفی و معنی‌داری نشان داده است. به طور مشابه راولز و براکزیک (1989)، نیز از رطوبت θ_{10} تا θ_{300} کیلوپاسکال رابطه معنی‌داری با فراوانی نسبی شن بدست آورده‌اند. هرچه از نقطه اشباع دور شده و به θ_{1500} کیلوپاسکال نزدیک می‌شویم رطوبت نگهداری شده به میزان منافذ بسیار ریز و به سطح ویژه ذرات خاک بستگی دارد. با بالا رفتن مقدار شن تخلخل ریز کمتر شده و از طرفی ذرات شن بر روی سطح ویژه تأثیر بسیار کمی دارند (برعکس ذرات رس)، لذا سبب نگهداری رطوبت کمتری در خاک می‌شوند. پارامتر مستقل بعدی که در تمامی توابع نقطه‌ای وارد شده، جرم ویژه ظاهری خاک است. در این توابع فقط اثر تخلخل کل با استفاده از جرم ویژه ظاهری وارد شده و شاخصی برای بیان کمی توزیع تخلخل وجود ندارد (خداوردیلو و همایی، 2004). چون رطوبت نگهداری شده در قسمت ابتدایی منحنی رطوبتی، تحت تأثیر ساختمان خاک است لذا مشاهده می‌شود که در این قسمت منحنی رطوبتی ضریب تبیین نسبت به قسمت‌های بالاتر منحنی رطوبتی کمتر است. اما در قسمت‌های بالاتر منحنی رطوبتی چون نگهداری رطوبت بیشتر تحت تأثیر بافت خاک است نه ساختمان خاک، توابع ارائه شده برآورد بهتری از این نقاط به ما می‌دهند. - با توجه به شکل 1 نیز ملاحظه می‌شود در مکش‌های بالاتر (رطوبت کمتر)، همبستگی بین مقادیر رطوبت برآورده شده و اندازه‌گیری شده بالاتر رفته است.

خاک، توزیع اندازه منافذ خاک و قابلیت نفوذ آب به خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

پژوهش‌های انجام‌شده توسط دیگران نیز، منجر به بدست آوردن روابطی با ضریب تبیین پایین برای توابع پارامتریک نسبت به توابع نقطه‌ای شده است. با این وجود ویریکین و همکاران (1992) استدلال کردند که تکنیک پارامتریک دارای محاسن زیر است: اولاً ساده بودن مقایسات کارآمد بین خاک‌ها (از لحاظ خصوصیات هیدرولیکی) با استفاده از این پارامترها و ثانیاً لازم نیست که متغیر وابسته در سطوح از پیش تعیین شده پتانسیل آب خاک اندازه‌گیری شود. با توجه به توابع انتقالی بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که: الف) توابع نقطه‌ای نسبت به توابع پارامتریک روابط بهتری را نشان داده‌اند. ب) روابط بهتری برای قسمت‌های انتهایی منحنی رطوبتی نسبت به قسمت‌های ابتدایی (رطوبت زیاد) بدست آمده که بدلیل وابستگی قسمت‌های انتهایی منحنی رطوبتی به بافت خاک است. ج) مقادیر بالای پارامتر EC و یا به عبارتی SAR (چون دارای همبستگی بالایی بوده‌اند) توانسته است قسمتی از رفتار غیرعادی این خاک‌ها را که نتیجه انبساط و انقباض است توجیه کرده و سبب بهتر شدن روابط گردد.

نتیجه ارزیابی سایر توابع انتقالی بدست آمده و

مقایسه آن با توابع بدست آمده برای خاک‌های مورد

مطالعه

عباسی و همکاران (2011)، با استفاده از داده‌های بدست آمده در این مطالعه برای 68 نمونه خاک (خصوصیات دیریافت و زودیافت)، توابع انتقالی مختلفی که در جدول 6 آمده است را جهت تخمین منحنی رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که تابع ارائه شده توسط ساکستون و همکاران (1986) بهترین مدل در تخمین منحنی رطوبتی در خاک‌های شور و شور و سدیمی تحت مطالعه بود (جدول 6).

مقایسه پارامترهای آماری بدست آمده برای توابع قبلی و توابع بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که

هم توابع نقطه‌ای و هم توابع پارامتریک بدست آمده، تخمین بسیار بهتری از منحنی رطوبتی را نسبت به توابعی که قبلاً توسط عباسی و همکاران (2011) مورد ارزیابی قرار گرفته، بدست می‌دهند (جدول 6 و شکل 3). شکل 3 همچنین مؤید این مطلب است که توابع نقطه‌ای تخمین بهتری از منحنی رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه (کلیه نقاط اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی) را نسبت به توابع پارامتریک ارائه می‌دهند. بایستی به این نکته توجه داشت که در این مطالعه از رگرسیون خطی چندگانه جهت تخمین متغیرهای وابسته استفاده شده و ممکن است رگرسیون غیر خطی منجر به نتایج بهتری نسبت به این توابع شود.

نتیجه‌گیری

به طور کلی یافته‌های این پژوهش نشان داد: 1- با استفاده از توابع انتقالی می‌توان نقاط مختلف منحنی رطوبتی خاک و پارامترهای معادله وان‌گونختن را در خاک‌های شور و شور و سدیمی مورد مطالعه به میزان قابل قبولی تخمین زد. 2- با توجه به ضریب پارامتر EC در معادلات و با توجه به ضرایب همبستگی جزئی و نتایج آنالیز حساسیت، مقادیر بالای پارامتر EC می‌تواند توزیع اندازه منافذ و نهایتاً شکل منحنی رطوبتی را بواسطه انبساط و انقباض تغییر دهد و این تغییرات را می‌توان با وارد کردن این دو پارامتر در ایجاد توابع، تا حدودی لحاظ کرد. 3- مقایسه نتایج بدست آمده برای توابع قبلی (13 تابع) و توابع بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که توابع نقطه‌ای و پارامتریک بدست آمده، تخمین بهتری از منحنی رطوبتی را بدست می‌دهند.

با توجه به خصوصیات خاک‌های کشور ما و با توجه به شرایط خاص آب و هوایی توصیه می‌شود برای هر منطقه با توجه به نوع خاک‌ها و خصوصیات آنها توابعی به صورت جداگانه بدست بیاید و در زمان استفاده از سایر توابعی که برای نقاط دیگر بدست آمده، این توابع از نظر دقت در برآورد مورد ارزیابی قرار بگیرد.

جدول 1- دامنه تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکهای مورد مطالعه

نسبت جذب سدیم	هدایت الکتریکی اشباع (dS/m)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	آهک (%)	کربن آلی (%)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	
0/97	4/06	1/17	5/28	0/1	1/05	26/62	9/56	حداقل
256/40	110/51	1/81	28/65	1/51	63/82	64/82	58/04	حداکثر
19/21	15/16	1/52	14/84	0/61	14	48/27	31/78	میانگین هندسی

جدول 2- ضرایب اجزای وارد شده (خصوصیات زودیافت) به هر کدام از معادلات، جهت پیش‌بینی نقاط منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن

متغیر وابسته	Intercept	C	S	C/Si	Bd	Lime	OC	EC
θ_{10}^*	158/3		0/319	10	-25/7			-0/093
θ_{33}	-2/29		-0/205	-7/13	26/3			0/137
θ_{100}^*	-5/46		-0/228	-5/44	22/4			0/131
θ_{300}	-1/46		-0/174		15		-1/41	0/091
θ_{500}	-0/82		-0/159		12/8			0/083
θ_{1000}	-1/66		-0/046	0/724	3/227	-0/0298	-0/337	0/021
θ_{1500}	3/89		-0/164		9/474	-0/0867		0/0587
θ_r^*	5/22	0/37						-0/038
θ_s^*	-18		-0/381	-20/1	45/9	-0/51	-3/7	0/118
α^*	75/255							-0/402
n^*	0/711		-0/022	-2/264	3/869			0/03

θ : رطوبت حجمی در مکشهای متناظر (%). Bd : جرم ویژه ظاهری خاک (g/cm³). EC : قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (dS/m)، C : رس (%). Si : سیلت (%). S : شن (%). OC : کربن آلی (%). $Lime$: آهک (%).

جدول 3- پارامترهای آماری بدست آمده برای هر کدام از معادلات، جهت تعیین کارایی و ارزیابی آنها

متغیر وابسته	R ² _{Adj}	RMSE	GMER
θ_{10}^*	57/7***	0/0296	1/0038
θ_{33}	74/5***	0/0272	1/0063
θ_{100}^*	77/9***	0/0233	1/0040
θ_{300}	82/6***	0/0152	1/0078
θ_{500}	82/7***	0/0129	1/0007
θ_{1000}	84/4***	0/0121	1/0024
θ_{1500}	82/5***	0/0139	0/9563
θ_r^*	54/4***	0/0282	1/1394
θ_s^*	63/5***	0/0421	1/0136
α^*	21/0***	0/0083	0/9311
n^*	55/8***	0/1252	0/9902

***: معنی دار در سطح 0/1 درصد.

جدول 4- ضرایب همبستگی جزئی معادلات بدست آمده برای هر کدام از اجزای معادلات (خصوصیات زودبافت)

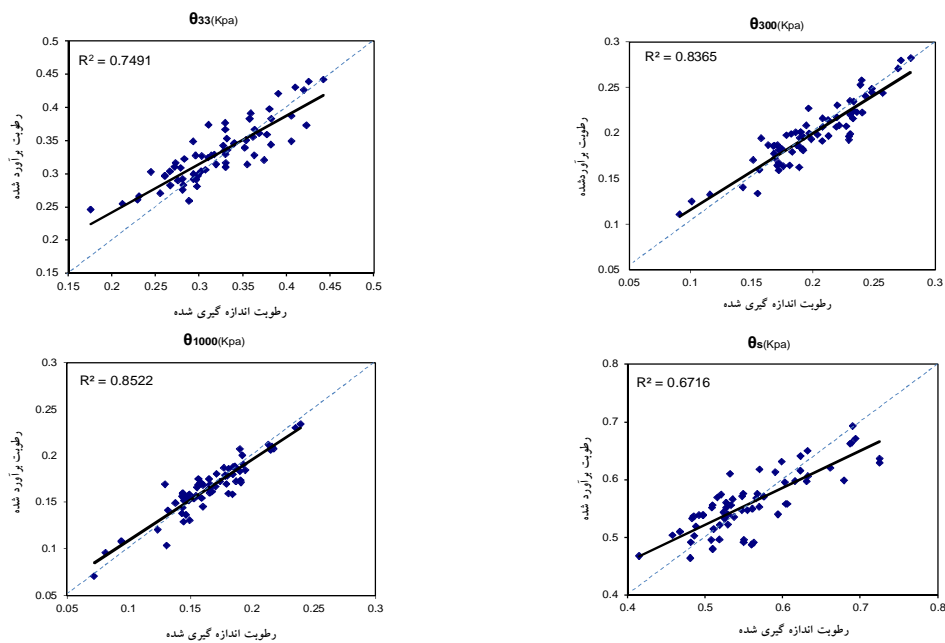
متغیر وابسته	C	S	C/Si	Bd	Lime	OC	EC
θ_{10}^*		0/635	0/352	-0/591			-0/639
θ_{33}		-0/661	-0/356	0/701			0/839
θ_{100}^*		-0/633	0/28	0/708			0/872
θ_{300}		-0/806		0/730		-0/229	0/877
θ_{500}		-0/832		0/727			0/875
θ_{1000}		-0/856	0/1	0/711	-0/217	-0/178	0/856
θ_{1500}		-0/854		0/673	-0/278		0/812
θ_r^*	0/683						-0/321
θ_s^*		-0/571	0/116	0/578	-0/388		0/567
α^*							-0/407
n^*		-0/077	-0/181	0/204			0/677

جدول 5- شاخص حساسیت برای هر کدام از ورودیهای توابع بدست آمده (قدر مطلق)

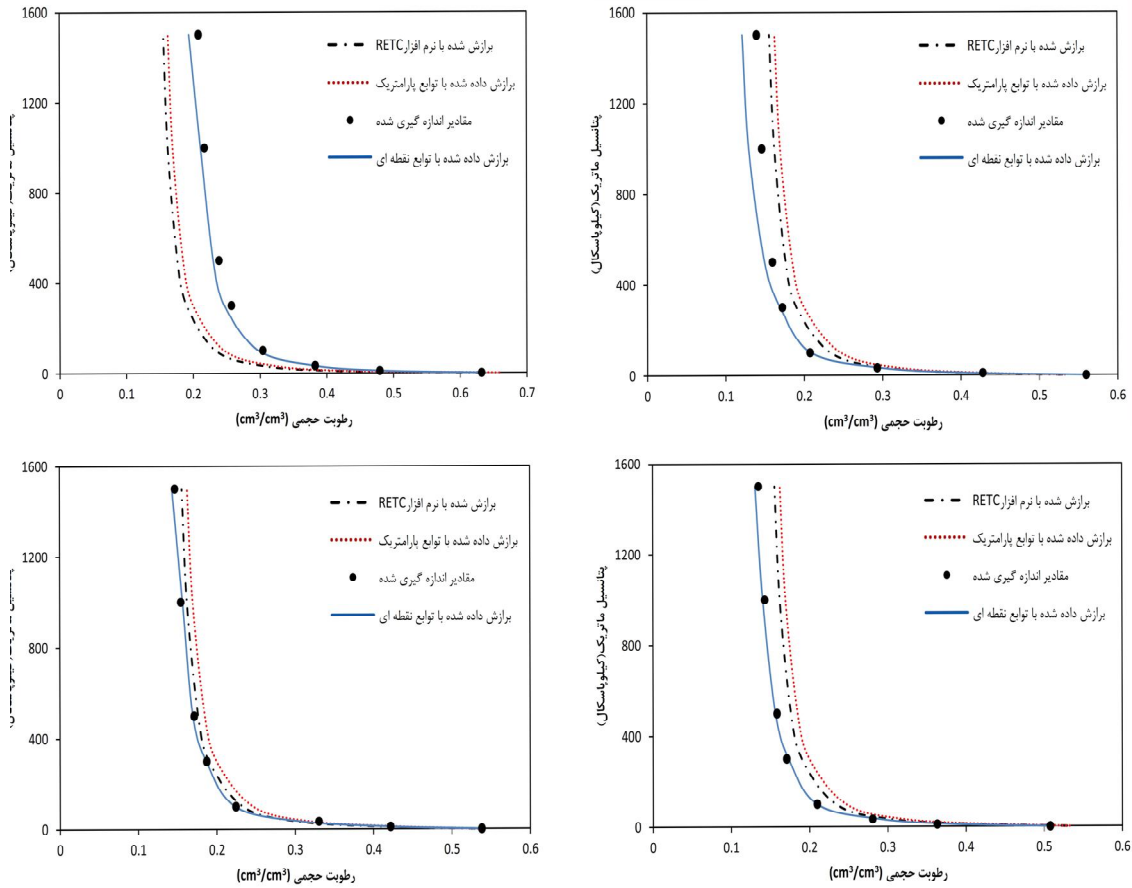
متغیر وابسته	C	S	C/Si	Bd	Lime	OC	EC
θ_{10}^*	حداکثر		0/141	1/04	0/383		0/085
	حداقل		0/003	0/27	0/217		0/003
	میانگین		0/043	0/531	0/31		0/03
θ_{33}	حداکثر		0/555	0/364	1/29		0/342
	حداقل		0/006	0/068	1/17		0/02
	میانگین		0/118	0/151	1/21		0/129
θ_{100}^*	حداکثر		0/67	0/315	1/575		0/41
	حداقل		0/008	0/075	1/307		/03
	میانگین		0/187	0/153	1/394		0/185
θ_{300}	حداکثر		0/935		1/076	0/114	0/367
	حداقل		0/008		0/06	0/007	0/023
	میانگین		0/174		0/512	0/048	0/144
θ_{500}	حداکثر		0/935		1/095		0/4
	حداقل		0/008		1/06		0/021
	میانگین		0/175		1/072		0/164
θ_{1000}	حداکثر		2/126	0/365	2/264	0/349	0/199
	حداقل		0/013	0/081	1/574	0/05	0/011
	میانگین		0/4	0/180	1/77	0/167	0/082
θ_{1500}	حداکثر		1/335		0/946	0/174	0/322
	حداقل		0/009		0/918	0/028	0/018
	میانگین		0/22		0/936	0/088	0/14
θ_r^*	حداکثر	0/84					0/314
	حداقل	0/46					0/009
	میانگین	0/734					0/1
θ_s^*	حداکثر		3/73	3/04	6/82	0/84	0/267
	حداقل		0/013	0/219	2/22	0/092	0/014
	میانگین		0/38	0/65	3/04	0/34	0/1
α^*	حداکثر						1/5
	حداقل						0/022
	میانگین						0/22
n^*	حداکثر		0/003	0/008	0/011		0/005
	حداقل		0/00004	0/001	0/010		/0002
	میانگین		0/0007	0/003	0/0107		0/002

جدول 6- ارزیابی سایر توابع انتقالی بدست آمده و مقایسه آن با توابع بدست آمده برای خاکهای مورد مطالعه

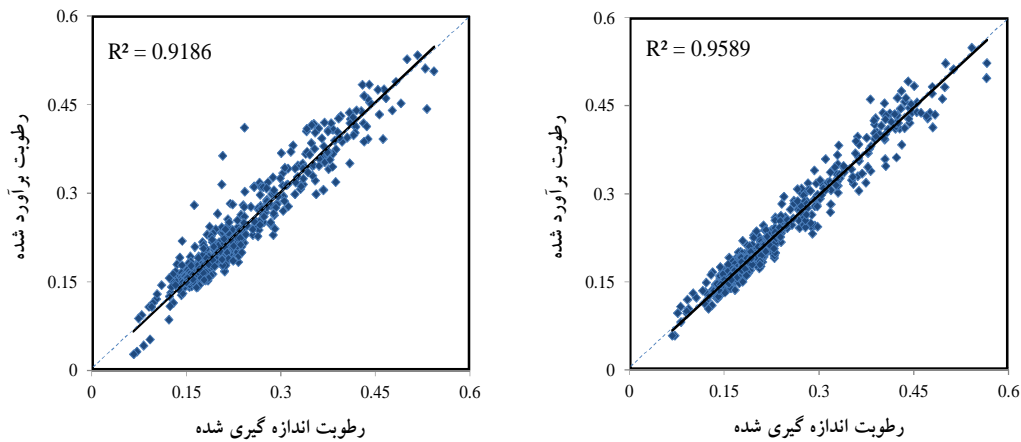
شماره تابع	توابع انتقالی	GMER	AIC	RMSE (cm^3/cm^3)
1	ویریکین و همکاران (1989)	1/36	-2 307	0/087
2	راولز و براکتزیک (1989)	0/61	-2 282	0/090
3	کمپل (1985)	1/61	-1 769	0/149
4	ووستن و همکاران (1999)	1/76	-1 638	0/177
5	ساکستون و همکاران (1986)	1/17	-2 529	/070
6	قربانی دشتکی و همایی (1) (2004)	1/15	-1 953	0/056
7	قربانی دشتکی و همایی (2) (2004)	1/11	-1 597	0/052
8	قربانی دشتکی و همایی (3) (2004)	1/84	-1 514	0/201
9	قربانی دشتکی و همایی (4) (2004)	1/76	-1 559	0/192
10	رزتا	1/61	-1 759	0/155
11	راجکای و همکاران (2004) (LR8)	1/80	-1 603	0/182
12	راجکای و همکاران (2004) (NLR8)	1/85	-1 570	0/189
13	زاکاریاس و وسولک (2007)	1/82	-1 626	0/179
14	توابع نقطه‌ای بدست آمده در این مطالعه	0/998	-3 655	0/0202
15	توابع پارامتریک بدست آمده در این مطالعه	1/008	-3 421	0/0273



شکل 1- میزان همبستگی بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده (با توجه به توزیع نقاط در اطراف خط یک به یک) در تعدادی از توابع نقطه‌ای (رطوبت خاک در پتانسیلهای 33- ، 300- و 1000- کیلوپاسکال) و پارامتریک (رطوبت اشباع)



شکل 2- منحنی‌های رطوبتی بدست آمده با توابع نقطه‌ای و پارامتریک و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده برای 4 خاک مختلف که از میان خاک‌های مورد مطالعه بصورت تصادفی انتخاب شده‌اند



شکل 3- میزان همبستگی بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده در توابع نقطه‌ای (سمت راست) و پارامتریک (سمت چپ) برای کل خاک‌های مورد مطالعه

فهرست منابع:

1. بی‌نام. 1361. گزارش مطالعات خاکشناسی نیمه‌تفضیلی اراضی جنوب تهران (استان تهران). وزارت کشاورزی و عمران روستایی. سازمان تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه شماره 616.
2. رضایی، ع و ا. سلطانی. 1382. مقدمه‌ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی. چاپ دوم. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
3. Abbasi, Y., B. Ghanbarian-Alavijeh, A. M. Liaghat, and M. Shorafa. 2011. Evaluation of Pedotransfer Functions for Estimating Soil Water Retention Curve of Saline and Saline-Alkali Soils of Iran. *Pedosphere*. 21(2): 230-237.
4. Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9: 177-213.
5. Campbell, G. S. 1985. *Soil Physics with Basic*. Elsevier, New York.
6. Carter, M. R., and E. G. Gregorich. 2008. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian society of soil science. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
7. Chatterjee, S., and A. S. Hadi. 1988. *Sensitivity analysis in linear regression*. John Wiley & Sons, New York.
8. Ghorbani Dashtaki, Sh., and M. Homaei. 2004. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions. In Whrle, N. and Scheurer, M. (eds.) *EuroSoil*. September 4–12, 2004. Freiburg, Germany. 10(30): 1–10.
9. Gupta, S. C., and W. E. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Res. Research*. 15(6): 1633-1635.
10. Hillel, D. 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA.
11. Khodaverdiloo, H., and M. Homaei. 2004. Pedotransfer functions of some calcareous soils. 10(27): 1–11. In *EuroSoil*. N. Whrle, and M. Scheurer, (eds.). 4–12 Sept. 2004. Freiburg, Germany.
12. Lima, L. A., M. E. Grismer, and D. R. Nielsen. 1990. Salinity effect on yolo loam hydraulic properties. *Soil Sci.* 150(1): 451-458.
13. Morgan, R. P. C. 2005. *Soil erosion & Conservation*. Third edition. Blackwell Publishing. United Kingdom.
14. Mugabe, F. T. 2004. Pedotransfer functions for prediction three points on the moisture characteristics curve of a Zimbabwean soil. *Asian J. Plant Sci.* 3(6): 679-682.
15. Pachepsky, Ya. A., D. Timlin, and G. Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 727-73.
16. Rajkai, K., S. Kabos, and M. Th. van Genuchten. 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil Till. Res.* 79: 145–152.
17. Rajkai, K., S. Kabos, M. Th. van Genuchten, and P. E. Jansson. 1996. Estimation of water retention characteristics from the bulk density and particle-size distribution of Swedish soils. *Soil Sci.* 161: 832-845.
18. Rawls, W. J., and D. L. Brakenziek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. P. 275-300. In H. J. Morel-Seytoux, (ed.) *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling-Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht.
19. Ruiz, V., L. Wu, and J. Lu. 2005. Effect of sodicity on the water characteristics of six California soils. In *The ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings*. 6-10 Nov. Salt Lake City, UT.
20. Russo, D., and E. Bresler. 1977. Effect of mixed Na/Ca solutions on the hydraulic properties of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 713-717.

21. Russo, D., and E. Bresler. 1980. Soil-water-suction relationships as affected by soil solution composition and concentration. p. 287-296. In A. Banin and U. Kafkafi (ed.) *Agrochemicals in soils*. Pergamon Press, N. Y. Elmsford.
22. Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031-1036.
23. Scheinost, A. C., W. Sinowski, and K. Auerswald. 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soil scape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*. 78: 129-143.
24. Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Leoppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johnston, and M. E. Sumner. 1996. *Methods of soil analysis*. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin, USA.
25. Tomasella, J., Ya. Pachepsky, S. Crestana, and W. J. Rawls. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1085-1092.
26. van Alphen, B. J., H. W. G. Booltink, and J. Bouma. 2001. Combining pedotransfer functions with physical measurement to improve the estimation of soil hydraulic properties. *Geoderma*. 103: 133-147.
27. van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
28. van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065, US Salinity laboratory, USDA-ARS, Riverside, CA.
29. Vereecken, H., J. Diels, J. van Orshoven, J. Feyen, and J. Bouma. 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1371-1378.
30. Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389-403.
31. Visser, W. C. 1969. The relation between lithological properties the shape of desorption curve. p. 305-311. In *Water in unsaturated zone*. Proc. of UNESCO/IASH symposium. Wageningen, Netherlands.
32. Wagner, B., V. R. Tarnawski, V. Hennings, U. Muller, G. Wessolek, and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*. 102: 275-297.
33. Wosten, J. H. M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90:169-185.
34. Zacharias, S., and G. Wessolek. 2007. Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 43-50.