

## تأثیر کاربرد درصد ذرات خاک در مقایسه با خصوصیات هندسی ذرات خاک بر دقت معادلات انتقالی منحنی مشخصه آب خاک و نقطه بحرانی آن

عبداله جاویدی، علی شعبانی و محمد جواد امیری<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱۹)

### چکیده

منحنی مشخصه آب خاک بیانگر حالات مختلف رطوبتی خاک است که ویژگی‌های بخش غیراشباع خاک را به صورت کمی بیان می‌کند. اندازه‌گیری مستقیم این منحنی وقت‌گیر، دشوار و پرهزینه است. بدین برای تلاش‌های زیادی به منظور برآورد غیرمستقیم منحنی مشخصه آب خاک از سایر ویژگی‌های خاک انجام گرفته است. یکی از روش‌های غیرمستقیم برآورد منحنی مشخصه آب خاک استفاده از توابع انتقالی خاک است. هدف از این پژوهش تأثیر کاربرد درصد ذرات خاک در مقایسه با کاربرد خصوصیات هندسی ذرات خاک بر دقت معادلات انتقالی منحنی مشخصه آب خاک و نقطه بحرانی آن است. برای این منظور، ۵۴ نمونه خاک استان اصفهان با هفت کلاس بافتی استفاده شد. مناسب‌ترین معادله برای برآورد منحنی مشخصه آب خاک، پارامترهای معادلات ون‌گنوختن و بروکس و کوری و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس شاخص‌های آماری تعیین شد. نتایج نشان داد که معادلات انتقالی به‌خوبی بر داده‌های منحنی مشخصه برآورد داده شد و برآورد حاصل از آنها، انطباق قابل قبولی با داده‌های مستقل (صحت‌سنجی) منحنی مشخصه داشته است. نتایج نشان داد که استفاده از درصد ذرات تشکیل دهنده خاک (شن و رس)، چگالی ظاهری و ماده آلی در برآورد نقطه‌ای منحنی مشخصه آب خاک، تخمین بهتری در مقایسه با استفاده از خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک داشته است. در حالی که در برآورد پارامتریک و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک استفاده از خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک نتایج رضایت‌بخش‌تری نسبت به کاربرد درصد ذرات خاک داشته است. مقادیر NRMSE نشان می‌دهد دقت توابع انتقالی برای مکش‌های پایین در مقایسه با مکش‌های بالا بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: منحنی مشخصه آب خاک، نقطه بحرانی، برآورد نقطه‌ای، برآورد پارامتریک

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mj\_amiri@fasau.ac.ir

## مقدمه

پژمردگی دائم، ظرفیت آب قابل استفاده، درصد خاک‌دانه‌های پایدار در آب و لگاریتم هدایت هیدرولیکی (اشباع) از پنج متغیر مستقل درصد شن، سیلت، رس، مواد آلی و جرم ویژه ظاهری ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد که ارتباط بین این متغیرها در کلاس‌های بافتی مختلف متفاوت بود و با تفکیک داده‌ها در قالب کلاس‌های بافتی هم‌راستایی چندگانه در بین متغیرهای مستقل به‌گونه معنی‌داری کاهش و اعتبار معادلات رگرسیونی افزایش یافت. همچنین آنها گزارش کردند که برآورد حاصل از این توابع انتقالی خاک، انطباق قابل قبولی با داده‌های مشاهده شده داشته‌اند. خداوردیلو و همایی (۱۶) در پژوهشی روی ۲۷ نمونه از سری خاک‌های منطقه کرج با بافت لوم نشان دادند که توابع انتقالی خاک در برآورد رطوبت‌های معادل در مکش صفر، ۱۰، ۳۳، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال کارآمد بودند. مقایسه منحنی‌های مشخصه آب خاک اشتقاق یافته با داده‌های اندازه‌گیری شده همبستگی معنی‌داری ( $P=0/001$ ) نشان دادند و برآورد رطوبت معادل نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم همبستگی بالایی ( $P=0/001$ ) با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان دادند. اما این همبستگی برای همه دامنه پیوسته رطوبت قابل استفاده مشاهده نشد. قربانی دشتکی و همایی (۱۵) به منظور ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد نقطه‌ای و پارامتریک منحنی مشخصه آب خاک متغیرهای مستقل را به دو گروه تقسیم کردند. متغیرهای گروه اول شامل فراوانی نسبی ذرات و جرم ویژه ظاهری و گروه دوم شامل جرم ویژه ظاهری، میانگین هندسی ( $dg$ ) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات ( $\sigma_g$ ) بود. آنها نتیجه گرفتند که متغیرهای گروه دوم برای برآورد پارامترهای معادلات ون‌گونختن مناسب‌تر است. همچنین متغیرهای گروه دوم نسبت به متغیرهای گروه اول برآورد بهتری از نقاط منحنی مشخصه آب خاک نشان دادند. وریکن و همکاران (۲۹) با استفاده از متغیرهای میزان شن، رس، کربن آلی و جرم ویژه ظاهری، توابعی برای برآورد پارامترهای معادله ون‌گونختن (۲۸) ارائه کردند که نتایج به‌دست آمده قابل قبول بوده است. آنها نشان دادند که اگر فراوانی نسبی ذرات به ۹ جزء (به جای ۳ جزء) تقسیم شود، توابع ارائه شده برای برآورد

منحنی مشخصه آب خاک (Soil Water Retention Curve) بیانگر حالات مختلف رطوبتی خاک است، به طوری که در یک مزرعه با تعیین منحنی مشخصه آب خاک می‌توان به وضعیت رطوبتی خاک پی برده و میزان آب قابل استفاده گیاه را در عمق بررسی شده، تعیین کرد (۴). اندازه‌گیری مستقیم منحنی مشخصه به دلیل غیرخطی بودن آن بسیار دشوار و پرهزینه است. از آنجا که نگهداشت آب توسط خاک از دیگر ویژگی‌های خاک مانند بافت و ساختمان خاک تأثیر می‌پذیرد، لذا امکان ایجاد روابط تجربی به منظور برآورد منحنی مشخصه آب خاک وجود دارد (۱۹). اثر منطقه‌ای بودن توابع انتقالی از یک سو و محدود بودن توابع انتقالی توسعه یافته برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها از سوی دیگر، می‌تواند بیانگر اهمیت مطالعه و پژوهش در خصوص توابع انتقالی باشد. توابع انتقالی منحنی مشخصه آب خاک به دو دسته توابع نقطه‌ای (ارائه تابع برای هر نقطه رطوبتی) و توابع انتقالی پارامتریک (ارائه توابع انتقالی برای پارامترهای معادلات منحنی مشخصه) تقسیم می‌شوند. توابع انتقالی پارامتریک برخلاف توابع انتقالی نقطه‌ای، تمام دامنه تغییرات منحنی مشخصه را برآورد می‌کنند و می‌توان آنها را به‌طور مستقیم در مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به‌کار گرفت (۱۲).

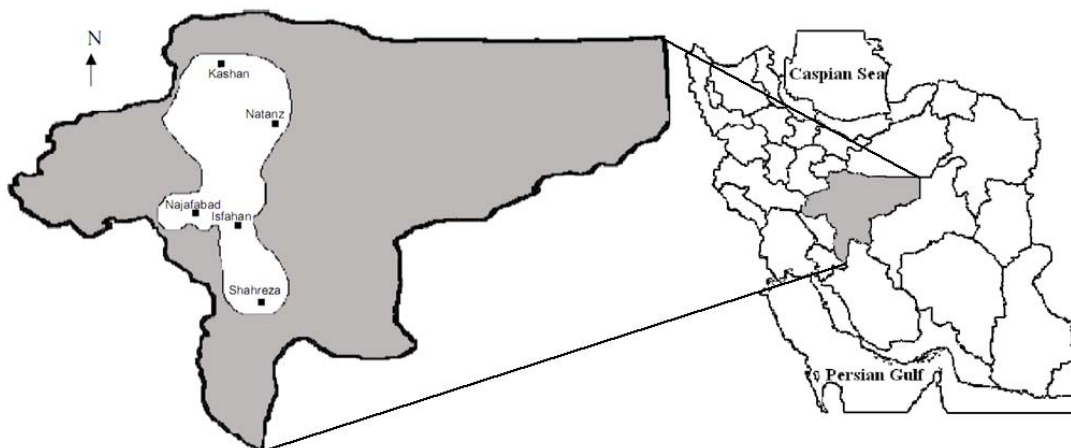
اخیراً استفاده از میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک ترجیح داده می‌شود. زیرا با وارد کردن این دو پارامتر در توابع، اثر کل دامنه قطر ذرات خاک در نظر گرفته می‌شود. میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک را می‌توان با وارد کردن فراوانی گروه‌های مختلفی از اندازه ذرات خاک (مثلاً ۳ ذره یا ۹ ذره) به دست آورد. از آنجا که در بیشتر مطالعات خاکشناسی فراوانی سه جزء از ذرات خاک (شن، سیلت و رس) اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین محاسبه این پارامترها با سه ذره ساده‌تر است. سانچو و همکاران (۲۵) طی پژوهشی در جنوب اوهایو با تفکیک خاک‌ها در چهار کلاس بافتی، توابعی را برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی (رطوبت ظرفیت مزرعه، نقطه

پارامترهای  $n$  و  $\alpha$  استفاده شوند.

جریان کاپیلاری و غشایی دو مکانیسم مهم توصیف نحوه حرکت آب در خاک‌ها هستند. تعیین دقیق نقطه انتقالی بین آب کاپیلاری و جذبی برای تخمین هدایت هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع ضروری است (۱۷). این نقطه که به‌عنوان نقطه بحرانی (SWRC) شناخته می‌شود، با استفاده از مختصات پتانسیل ماتریک بحرانی و رطوبت بحرانی از منحنی مشخصه آب خاک تعیین می‌شود (۳۰). معمولاً نقطه بحرانی با دو روش به‌دست می‌آید: روش فشیر (۱۹) و روش وب (۲۹). در روش فشیر (۱۱) فرض بر این است که ذرات خاک کروی صاف هستند و پتانسیل ماتریک بحرانی با استفاده از قطر ذرات مؤثر تخمین زده می‌شود. بر اساس این روش، پتانسیل ماتریک بحرانی متناسب است با معکوس قطر ذرات خاک و برای خاک‌های با بافت ریزتر، منفی‌تر است. با توجه به اینکه ذرات خاک کروی صاف نیستند، ژانگ (۳۱) بیان داشت که ممکن است روش فشیر (۱۱) برای خاک‌های واقعی قابل کاربرد نباشد. روش وب (۳۰)، با استفاده از مدل‌های بروکس و کوری (۵) یا ون‌گنوختن (۲۷ و ۲۸)، SWRC را تعیین می‌کند (۶). SWRC با توجه به میزان رطوبت در مقابل لگاریتم طبیعی منفی پتانسیل ماتریک برحسب سانتی‌متر آب ( $(-17) \log_{10}$ ) رسم می‌شود. وب منحنی مشخصه آب خاک را به دو ناحیه شاخه خشک و شاخه مرطوب تقسیم کرد، که این دو بخش را می‌توان به‌ترتیب با مدل ون‌گنوختن و یک تابع نیمه لگاریتمی توصیف کرد. مدل ون‌گنوختن برای توصیف شاخه مرطوب منحنی مشخصه آب خاک ( $SWRC_w$ ) به‌کار می‌رود. چونگ و همکاران (۷) روش جدیدی برای تعیین نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک ارائه دادند. ایشان با مدل‌سازی شاخه خشک و مرطوب منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از مدل‌های کمپل-شیوزاوا و ون‌گنوختن یک روش خطی مماس ثابت برای تخمین نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک پیشنهاد دادند. نتایج آنها نشان داد نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک با توزیع اندازه ذرات و سطح ویژه ذرات خاک رابطه داد.

هدف از این مطالعه، مقایسه کاربرد سه جزء از ذرات خاک

برآورد بهتری خواهد داشت. فرخیان و همایی (۹ و ۱۰) برای ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک در خاک‌های گچی شرق اصفهان، متغیرهای مستقل را به دو گروه تقسیم کردند. گروه اول شامل فراوانی نسبی ذرات، جرم ویژه ظاهری و درصد گچ و گروه دوم شامل درصد گچ، جرم ویژه ظاهری، میانگین هندسی ذرات و انحراف معیار هندسی قطر ذرات بود. نتایج آنها نشان داد که در خاک‌های گچی استفاده از فراوانی نسبی ذرات به جای دو پارامتر میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات می‌تواند برآورد بهتری از پارامترهای ون‌گنوختن داشته باشد. همچنین متغیرهای دسته اول برآورد بهتری از مقدار رطوبت در پتانسیل‌های صفر، ۱۰، -۳۳، -۱۰۰، -۳۰۰، -۵۰۰ و -۱۵۰۰ کیلوپاسکال نسبت به پارامترهای گروه دوم دارند. فولادمنند و هادی‌پور (۱۳) با بررسی ۱۲ تابع انتقالی پارامتریک که توسط پژوهشگران داخلی و خارجی برای برآورد منحنی مشخصه ارائه شده بود برای ۳۰ نمونه خاک استان فارس مشاهده کردند که توابع انتقالی معرفی شده به‌وسیله پژوهشگران داخلی برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک دارای دقت کمتری نسبت به توابع معرفی شده توسط پژوهشگران خارجی بوده است. این پژوهشگران علت آن را تعداد کم داده‌های مورد استفاده برای ایجاد توابع انتقالی بیان کردند و بر ارائه توابع جامع‌تر و دقت بیشتر تأکید کردند. نتایج تحقیق راجکای و همکاران (۲۰) نشان دادند که کاربرد معادلات غیرخطی نسبت به معادلات خطی به‌عنوان توابع انتقالی منجر به نتایج بهتر و دقیق‌تری برای برآورد پارامترهای معادله منحنی مشخصه ون‌گنوختن شده است. رضانی و همکاران (۲۱) با مقایسه نتایج تخمین منحنی مشخصه با استفاده از توابع انتقالی با نتایج حاصل از مدل رزتا، نشان دادند که کاربرد توابع انتقالی منجر به تخمین دقیق‌تر منحنی مشخصه شد. گنجی آزادپور و همکاران (۱۴) بیان کردند که در مناطق مختلف نتایج متفاوتی برای توابع انتقالی، گزارش شده است که نشان می‌دهد در هر منطقه پیش از استفاده از توابع انتقالی ابتدا باید توابع مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس در منطقه



شکل ۱. شهرستان‌ها و نواحی پژوهش

به منظور کاربرد در پژوهش با روش‌های استاندارد معمول تعیین شد. فراوانی نسبی ذرات خاک (درصد شن، سیلت و رس) به روش هیدرومتری بر پایه قانون استوکس اندازه‌گیری و طبق استاندارد ASTM D(۴۲۲) آنالیز شد (۳). کل ماده آلی به روش والکی بلک (۱)، جرم ویژه ظاهری به روش سیلندر بر اساس استاندارد ASTM D(۳۳۸۵-۰۳) (۲) و منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (۱) و در مکش‌های صفر، ۳۳، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد.

#### تئوری مدل

در برآورد پارامتریک، پارامترهای مربوط به معادله چهار پارامتری ون‌گونوختن (۲۸) با فرض  $m = 1 - (1/n)$  و معادله بروکس و کوری (۱۶) برآورد شد. معادله ون‌گونوختن و پارامترهای آن به شرح ذیل است:

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

که در آن  $\theta$  رطوبت خاک در مکش  $h$  بر اساس  $gg^{-1}$ ،  $h$  پتانسیل ماتریک خاک بر اساس سانتی‌متر آب،  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک بر اساس  $gg^{-1}$ ،  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده خاک بر اساس  $gg^{-1}$  و  $\alpha$  و  $n$  پارامترهای تجربی هستند که شکل منحنی مشخصه آب خاک را

(شن، سیلت و رس) با میانگین هندسی و انحراف هندسی قطر ذرات خاک در برآورد نقطه‌ای، پارامتریک (پارامترهای معادله ون‌گونوختن و بروکس و کوری) و مختصات نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس روش جدید ارائه شده توسط چونگ و همکاران (۷) است. در برآورد نقطه‌ای، مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک معین برآورد می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

##### اطلاعات و ناحیه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شهرستان‌های استان اصفهان شامل نجف‌آباد، شهرضا، نطنز، کاشان، شمال شهر اصفهان و همچنین مجاور رودخانه زاینده‌رود است. موقعیت جغرافیایی مناطق پژوهش  $31^{\circ} 54' 21''$  تا  $34^{\circ} 05' 31''$  درجه شمالی و  $51^{\circ} 05' 30''$  تا  $52^{\circ} 38' 31''$  درجه شرقی است. موقعیت مکانی نواحی مورد مطالعه در شکل (۱) آمده است.

##### نمونه‌برداری خاک

تعداد ۵۴ نمونه خاک به صورت دست نخورده از مناطق مورد مطالعه به روش نمونه‌برداری تصادفی و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری سطح زمین برداشت شد. نمونه‌ها از الک دو میلی‌متر گذرانده شدند. سپس پاره‌ای از خصوصیات زودپافت نمونه‌ها

که در آن  $\psi_0$  پتانسیل ماتریک در شرایط خشک ( $\theta = 0 \text{ gg}^{-1}$ ) که معمولاً برابر با  $10^{-6/91}$  فرض می‌شود،  $\log_{10}(-\psi)$  لگاریتم منفی پتانسیل ماتریک برحسب سانتی متر آب،  $a$  شیب بدون بعد مدل خطی و  $\theta$  رطوبت خاک برحسب  $\text{gg}^{-1}$  است. اگر  $\theta > \theta_c$  باشد، عمده حرکت آب در خاک به صورت جریان کاپیلاری و اگر  $\theta < \theta_c$  باشد، عمده جریان غشایی است.

برای تعیین نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از مدل وب، پارامترهای  $\theta_s$ ،  $\theta_r$ ،  $n$  و  $\alpha$  با برازش مدل ون گنوختن به رطوبت و پتانسیل‌های ماتریک اندازه‌گیری شده به دست آمد.  $\text{SWRC}_w$  با رسم میزان رطوبت در مقابل لگاریتم منفی پتانسیل ماتریک به دست آمد. در انتها معادلات زیر برای تخمین رطوبت و پتانسیل ماتریک بحرانی استفاده شد (۶):

$$\log_{10}^{(6/91)} = a\theta_c - \log_{10}^{(-\psi_c)} \quad (8)$$

$$\psi_c = -\frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\theta_c - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/n} \quad (9)$$

$$a = -(\log_{10}^{(6/91)}) \frac{1}{mn} \frac{1}{\theta_c - \theta_r} \frac{1}{1 - \left( \frac{\theta_c - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m}} \quad (10)$$

به منظور برآورد پارامترهای معادلات منحنی مشخصه آب خاک، از نرم افزار کامپیوتری RETC ۶/۰۲ استفاده شد (۲۶). با استفاده از این نرم افزار ابتدا معادلات ون گنوختن و بروکس و کوری انتخاب و مقادیر رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف، برای هر نمونه در نرم افزار وارد و پارامترهای معادلات ون گنوختن و بروکس و کوری با استفاده از روش حداقل مربعات خطا برآورد شدند.

از بین داده‌های اندازه‌گیری شده، ۸۰ درصد کل نمونه خاک‌ها یعنی تعداد ۴۳ نمونه خاک برای ایجاد توابع و ۲۰ درصد کل نمونه خاک‌ها که برابر با ۱۱ نمونه خاک بود، به منظور ارزیابی اعتبار و صحت‌سنجی توابع به کار رفت. انتخاب نمونه‌ها کاملاً تصادفی و با نرم افزار Microsoft Excel ۲۰۱۰ صورت پذیرفت. سپس آزمون نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم افزار Minitab ۱۸ انجام گرفت (۲۰). غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها، آزمون‌های فرض را غیرمعتبر می‌سازد. زیرا این آزمون با فرض نرمال بودن

مشخص می‌کنند.  $n$  بدون بعد و  $\alpha$  برحسب  $\text{cm}^{-1}$  است و معادله بروکس و کوری به شرح ذیل است:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(\alpha h)^n} \quad (2)$$

در معادله بالا  $\theta$ ،  $h$ ،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  همان پارامترهای ذکر شده در معادله ون گنوختن (۲۷) هستند (۲۸).  $\alpha$  عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک بر اساس  $\text{cm}^{-1}$  و  $n$  ضریب توزیع اندازه منافذ خاک است که روی شیب تابع نگهداشت رطوبت تأثیر می‌گذارد. هرچه اندازه منافذ خاک دارای دامنه توزیع وسیع‌تری باشد،  $n$  کوچک‌تر می‌شود.

میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک با استفاده از روابط ارائه شده توسط شیرازی و برواسما (۲۶) محاسبه شد. این روابط به صورت زیر است:

$$d_g = \exp(a) \quad (3)$$

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \quad (4)$$

$$\sigma_g = \exp(b) \quad (5)$$

$$b^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 M_i - a^2 \quad (6)$$

که در این روابط ضریب ۰/۰۱ برای تبدیل درصد فراوانی ذرات وارد شده است.  $n$  تعداد گروه‌های جداگانه خاک (شن، سیلت و رس)،  $f_i$  درصد ذرات تشکیل دهنده،  $\ln$  لگاریتم طبیعی و  $M_i$  میانگین دو محدوده متوالی اندازه قطر ذرات است (۱۱). بنابراین  $M_i$  برای ذرات تشکیل دهنده خاک با توجه به استاندارد USDA به صورت زیر محاسبه شدند:

$$M_{\text{sand}} = \frac{0.05 + 2.0}{2} = 1.025 \text{ mm}$$

$$M_{\text{silt}} = \frac{0.002 + 0.05}{2} = 0.026 \text{ mm}$$

$$M_{\text{clay}} = \frac{0.0002 + 0.002}{2} = 0.001 \text{ mm}$$

مدل کمپل و شیازاوا (۶) عموماً برای توصیف شاخه خشک منحنی مشخصه آب خاک ( $\text{SWRC}_d$ ) استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود (۲۹):

$$\log_{10}^{(-\psi)} = a\theta + \log_{10}^{(-\psi_0)} \quad (7)$$

با توجه به اینکه مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است، مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده چندان مناسب نخواهد بود. بنابراین مقدار RMSE را بر میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، تقسیم و آن را RMSE نرمال شده (NRMSE) می‌نامند. این معیار برای مقایسه مدل‌های مختلف مناسب خواهد بود و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر کارایی بیشتر مدل است. NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است. شاخص همخوانی یا توافق دارای محدوده بین صفر تا یک است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، برآوردها با خطای کمتری با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌روند هستند (۲۴).

### نتایج و بحث

نوع بافت نمونه‌های خاک با استفاده از نرم‌افزار ۴/۲ TAL تعیین شد. بر اساس طبقه‌بندی استاندارد، نمونه‌ها دارای هفت بافت لوم (Loam)، لوم رسی (Clay Loam)، لوم شنی (Sandy Loam)، لوم سیلتی (Silt Loam)، لوم شنی رسی (Loam Sandy Clay)، لوم سیلتی رسی (Silty Clay Loam) و رس سیلتی (Silty Clay) بودند. پاره‌ای از خصوصیات فیزیکی خاک مناطق مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است.

بافت لوم رسی و لوم سیلتی رسی بیشترین تعداد (۱۵ نمونه) را شامل شدند. بیشتر نمونه‌ها در کلاس بافتی متوسط تا سنگین قرار داشتند. از هر بافت خاک به‌طور تصادفی یک نمونه انتخاب و مدل‌های ون‌گنوختن و بروکس و کوری برآزش داده شده بر آنها به‌عنوان نمونه در شکل (۲) ارائه شده است. در این شکل اعداد روبه‌روی هر مدل بیانگر ضریب تبیین آن است.

### ایجاد توابع انتقالی

#### توابع انتقالی بر اساس درصد ذرات خاک

جدول (۲) توابع نقطه‌ای و پارامتریک ارائه شده برای برآورد منحنی مشخصه آب خاک، پارامترهای معادلات ون‌گنوختن و

توزیع داده‌ها استوار است (۲۱). داده‌های غیرنرمال با استفاده از BOX-COX در نرم‌افزار ۱۸ Minitab به‌صورت زیر نرمال شد:

$$\alpha_{VG}^* = \alpha_{VG}^{-\circ/25} \quad (11)$$

$$\alpha_{BC}^* = \alpha_{BC}^{-\circ/5} \quad (12)$$

سپس همبستگی بین متغیرهای مستقل بررسی شد. زیرا در رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه همبستگی بالا بین متغیرهای مستقل ( $r > 0.7$ ) با ایجاد همراستایی چندگانه نتایج را غیرمعتبر می‌سازد. در گام بعد، متغیرهای مستقل به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل درصد ذرات شن و رس، جرم مخصوص ظاهری و مقدار کل ماده آلی و در گروه دوم نیز متغیرها شامل میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری و میزان کل ماده آلی بود. برای مدل‌سازی پارامترهای معادلات ون‌گنوختن، بروکس و کوری و همچنین نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک از نرم‌افزار ۲۴ SPSS و روش رگرسیون غیرخطی چندگانه استفاده شد.

برای ارزیابی اعتبار توابع، از ۱۱ نمونه خاک که در ایجاد توابع به‌کار نرفته بودند استفاده و مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف و پارامترهای معادلات ون‌گنوختن و بروکس و کوری و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک برای ۱۱ نمونه خاک با استفاده از توابع تعیین و با مقادیر اندازه‌گیری مقایسه شد. اعتبار مدل‌ها با استفاده از معیارهای جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافق (d) ارزیابی شد:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\theta_{meas}} \quad (13)$$

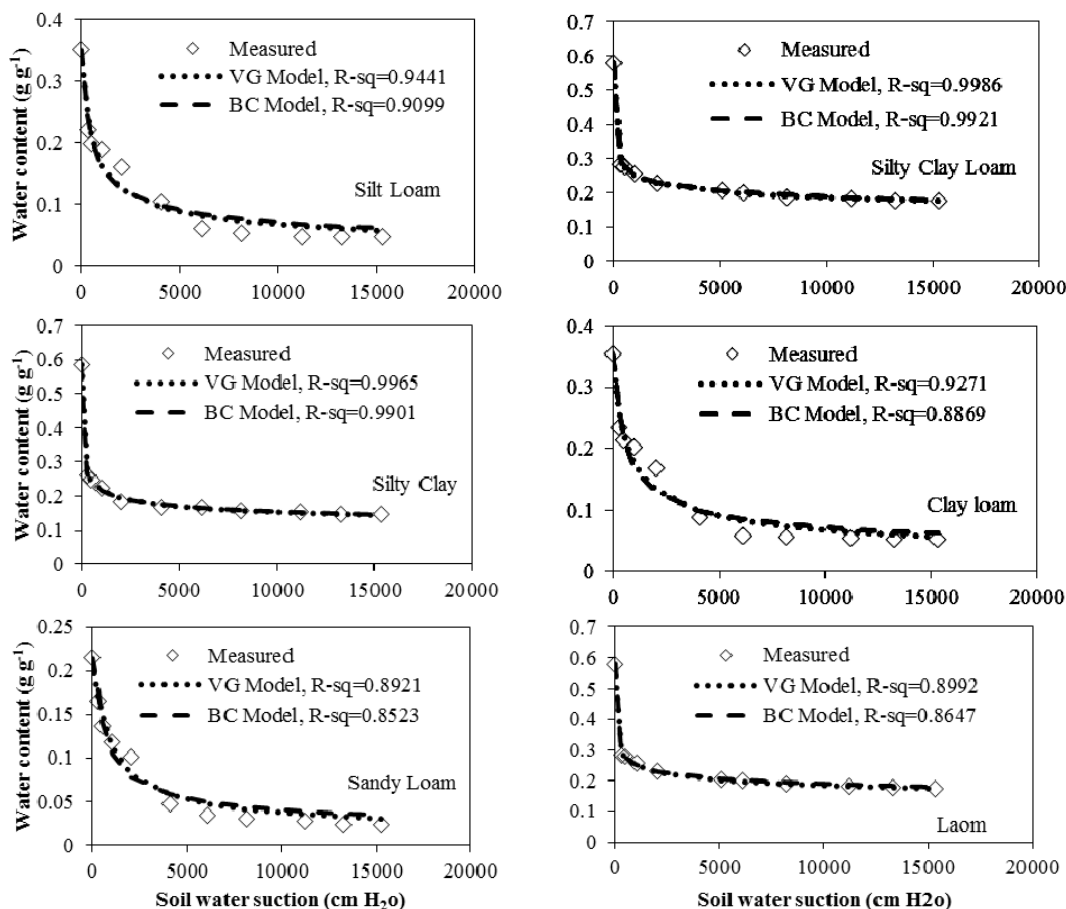
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{meas} - \theta_{fit})^2}{n}} \quad (14)$$

$$d = 1/\frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{meas} - \theta_{fit}|}{\sum_{i=1}^n (|\theta_{fit} - \bar{\theta}_{meas}| + |\theta_{meas} - \bar{\theta}_{meas}|)} \quad (15)$$

در روابط بالا،  $\theta_{meas}$  رطوبت اندازه‌گیری شده برحسب  $gg^{-1}$ ،  $\theta_{fit}$  رطوبت برآورد شده برحسب  $gg^{-1}$ ، میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده برحسب  $gg^{-1}$  و  $n$  تعداد نمونه‌ها است.

جدول ۱. درصد اجزای سه‌گانه بافت، میزان ماده آلی و چگالی ظاهری در نمونه‌های مورد مطالعه

چگالی ظاهری ( $\text{gcm}^{-3}$ )	ماده آلی (درصد)	درصد رس	درصد شن	درصد سیلت	تعداد نمونه	کلاس بافت خاک
$1/49 \pm 0/14$	$0/98 \pm 0/75$	$22/68 \pm 4/25$	$41/76 \pm 6/57$	$38/35 \pm 5/68$	۸	لوم
$1/55 \pm 0/07$	$1/09 \pm 0/67$	$32/37 \pm 3/43$	$36/63 \pm 7/98$	$31/82 \pm 4/96$	۱۵	لوم رسی
$1/42 \pm 0/15$	$0/86 \pm 0/39$	$16/89 \pm 3/19$	$54/25 \pm 1/44$	$26/45 \pm 3/42$	۵	لوم شنی
$1/48 \pm 0/15$	$0/76 \pm 0/42$	$18/84 \pm 3/39$	$31/5 \pm 5/68$	$46/85 \pm 4/17$	۲	لوم سیلتی
$1/37 \pm 0/28$	$2/46 \pm 1/12$	$26/18 \pm 1/37$	$54/96 \pm 4/44$	$18/85 \pm 3/55$	۱	لوم شنی رسی
$1/27 \pm 0/02$	$1/93 \pm 0/26$	$36/64 \pm 1/78$	$14/67 \pm 4/48$	$46/93 \pm 3/01$	۱۵	لوم سیلتی رسی
$1/31 \pm 0/19$	$1/77 \pm 0/2$	$42/88 \pm 1/46$	$13/37 \pm 3/33$	$45/45 \pm 6/49$	۸	رس سیلتی



شکل ۲. نمونه‌ای از مدل ون‌گنوختن (VG) و بروکس و کوری (BC) برازش داده شده بر کلاس‌های بافتی مختلف و ضریب تبیین آنها

توابع ارائه شده در سطح یک درصد معنی دارند. با توجه به نتایج، مقدار نگهداشت رطوبت خاک در مکش‌های مختلف به درصد

بروکس و کوری، نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس درصد ذرات خاک و ضریب تبیین روابط را نشان می‌دهد.



جدول ۲. توابع انتقالی نقطه‌ای، پارامتریک و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس درصد ذرات خاک

DV	Function	n	Sig	SE	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	d	NRMSE
$\theta_s$	$\frac{4}{63} \text{Sand} + 0.001 \text{Clay} - 0.065 \text{OM} + 0.03 \text{OM}^2 - 0.815 \text{Log}(\text{BD}) + 0.31$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۲۷۷	۰/۹۲۹۹	۰/۹۰۴	۰/۱۰۳۳
$\theta_{33}$	$0.3e^{-0.5 \text{Sand}} + 1.47/ve^{-3/6 \times 10^{-6} \text{Clay}} - 0.06 \text{OM} + 0.02 \text{OM}^2 - 3.4382/1e^{-12/3 \text{BD}} - 1.47/5$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۹۶	۰/۸۲۱۲	۰/۷۷۱	۰/۰۹۵۶
$\theta_{50}$	$1/0.2 \text{Sand}^{-0.46} - 9/48 \times 10^{-37} e^{1/8 \text{Clay}} - 0.03 \text{OM} + 0.015 \text{OM}^2 - 159/1e^{-6/8 \text{BD}} + 0.025$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۸۸	۰/۸۰۸۱	۰/۷۶۱	۰/۱۲۰۸
$\theta_{100}$	$1/2 \text{Sand}^{-0.24} + 0.009 \text{Clay} - 0.0002 \text{Clay}^2 - 2.84/2e^{-6/4 \times 10^{-5} \text{OM}} - 3.4246/0.4e^{-11/8 \text{BD}} + 2.83/77$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۹۱	۰/۷۲۲۶	۰/۷۰۴	۰/۱۵۹۶
$\theta_{200}$	$0.28e^{-0.3 \text{Sand}} - 3/0.6 \times 10^{-29} e^{1/4 \text{Clay}} - 0.99e^{-0.17 \text{OM}} + 1/0.27 \text{BD}^{0.4}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۹۷	۰/۵۱۲۹	۰/۶۹۸	۰/۲۸۳۹
$\theta_{500}$	$0.4e^{-0.6 \text{Sand}} - 4/1 \times 10^{-27} e^{1/3 \text{Clay}} + 0.02e^{0.44 \text{OM}} - 0.37 \text{BD}^{-25/1}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲۲	۰/۶۶۳۸	۰/۷۲۹	۰/۲۶۳۰
$\theta_{700}$	$1/15 \text{Sand}^{-0.3} - 1/ve^{0.001 \text{Clay}} + 1/4e^{0.009 \text{OM}} - 26/6 \text{BD}^{-112/6}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲۱	۰/۵۹۷۷	۰/۷۰۸	۰/۲۱۶۲
$\theta_{900}$	$0.48e^{-0.7 \text{Sand}} - 1/35 \times 10^{-28} e^{1/4 \text{Clay}} + 0.11e^{0.44 \text{OM}} - 0.34 \text{BD}^{-20/83}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲۳	۰/۶۵۵۱	۰/۷۶۰	۰/۲۱۴۲
$\theta_{1100}$	$0.45e^{-0.7 \text{Sand}} - 1/5 \times 10^{-28} e^{1/4 \text{Clay}} + 0.009e^{0.42 \text{OM}} - 1/4 \text{BD}^{-51/3}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۱۸	۰/۶۵۵۹	۰/۷۵۹	۰/۲۲۷۶
$\theta_{1300}$	$0.46e^{-0.75 \text{Sand}} - 6/8 \times 10^{-28} e^{1/36 \text{Clay}} + 0.009e^{0.47 \text{OM}} - 1/67 \text{BD}^{-55/59}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۱۵	۰/۶۳۶۷	۰/۷۵۰	۰/۲۶۸۳
$\theta_{1500}$	$0.42e^{-0.76 \text{Sand}} - 9/5 \times 10^{-29} e^{1/4 \text{Clay}} + 0.1e^{0.43 \text{OM}} - 1/6 \text{BD}^{-55/8}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۰۶	۰/۶۲۴۹	۰/۷۴۹	۰/۲۰۴۲
$n(\text{VG})$	$0.017 \text{Sand} - 0.0001 \text{Sand}^2 + 0.003 \text{Clay} - 0.03 \text{OM} + 0.07 \text{OM}^2 + 0.84 \text{Log}(\text{BD}) + 1/156$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۳۱۹	۰/۸۲۶۲	۰/۷۸۷	۰/۰۵۵۴
$\alpha^*(\text{VG})$	$0.2 \text{Sand} - 0.002 \text{Sand}^2 + 1/5ve^{-0.15 \text{Clay}} - 1/5ve^{0.009 \text{OM}} + 0.57 \text{OM}^2 + e^{-2/14 - 1/9 \text{BD}} - 1/5$	۴۳	۰/۰۱	۰/۱۸۴۳	۰/۸۸۴۲	۰/۶۸۲	۰/۲۰۲۰
$\theta_{\text{r}}(\text{VG})$	$2/13 \text{Sand}^{-0.3} - 2/7 \times 10^{-27} e^{1/31 \text{Clay}} - 1/9e^{-0.06 \text{OM}} + e^{-11/7 + 1/0.38 \text{BD}}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۵۹	۰/۷۸۹۹	۰/۷۳۲	۰/۲۱۴۴
$n(\text{BC})$	$0.005 \text{Sand} + 0.0005 \text{Clay} - 0.12 \text{OM} + 0.26 \text{OM}^2 + 0.71 \text{Log}(\text{BD}) + 0.19$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۲۰۲	۰/۸۶۵۵	۰/۷۹۶	۰/۱۳۹۵
$\alpha^*(\text{BC})$	$0.7 \text{Sand} - 0.008 \text{Sand}^2 - 0.16 \text{Clay} + 0.003 \text{Clay}^2 - 4/9 \text{OM} + 1/6 \text{OM}^2 + 25/9 \text{Log}(\text{BD}) - 2/9$	۴۳	۰/۰۱	۰/۱۴۷	۰/۹۰۸۱	۰/۷۰۹	۰/۱۹۲۶
$\theta_{\text{r}}(\text{BC})$	$2/0.1 \text{Sand}^{-0.28} - 2/1 \times 10^{-27} e^{1/3 \text{Clay}} - 1/9e^{-0.062 \text{OM}} + e^{-10/22 + 1/0.4 \text{BD}}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۶۱	۰/۸۱۲۶	۰/۷۳۳	۰/۱۹۳۷
$\theta_c$	$20/1e^{-4/7 \times 10^{-5} \text{Sand}} + e^{3/27 + 8/5 \times 10^{-5} \text{Clay}} - 1/3 \text{OM} - e^{-3/6 - 0.008 \text{BD}}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۶۷	۰/۷۱۷	۰/۷۵۴	۰/۱۷۵۳



ادامه جدول ۲.

	$-۶۲/۶\text{Sand} + ۳/۳۵\text{Sand}^۲ - ۲۶۲/۹\text{Clay} - ۳۶۵۶۰/۸\text{OM}$	۴۳	۰/۰۱	۲۷۸۸/۹	۰/۸۳۲۵	۰/۸۱۸	۰/۱۲۰۷
۷%	$+۱۱۵۸۸/۳\text{OM}^۲ - \frac{۹۵۵۰۱/۴}{\text{BD}} + ۱۲۵۷۶۶/۵$						

DV متغیر وابسته، Sand میزان شن (%،)، Clay میزان رس (%،) OM ماده آلی (%،) و BD چگالی ظاهری ( $\text{gcm}^{-۳}$ )

شده بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک نسبت به درصد ذرات خاک نتایج بهتری داشته است. در برآورد مختصات نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک (رطوبت و مکش بحرانی)، نتایج حاصل از توابع ایجاد شده بر اساس درصد ذرات خاک نسبت به خصوصیات هندسی ذرات برآورد بهتری را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان اظهار کرد که استفاده از توابع ایجاد شده برای برآورد پارامتریک و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک به دلیل استفاده از کل محدوده قطر ذرات خاک در محاسبه میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک برآورد بهتری نسبت به توابع ایجاد شده بر اساس درصد ذرات خاک داشته است و کاربرد این توابع توصیه می‌شود.

شکل (۳) همبستگی بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع نقطه‌ای بر اساس درصد ذرات خاک (A) و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک (B) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان بیان داشت که استفاده از توابع ایجاد شده بر اساس درصد ذرات خاک در برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف نتایج بهتری را نسبت به کاربرد توابع ایجاد شده بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات داشته است و کاربرد این دسته از توابع برای برآورد نقطه‌ای رطوبت در هر مکش معین، توصیه می‌شود.

شکل (۴) همبستگی بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع پارامتریک معادلات ون‌گنوختن و بروکس و کوری را بر اساس درصد ذرات خاک و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک نمایش می‌دهد. در این شکل نمودار A و B به ترتیب مربوط به مقایسه برآورد حاصل از پارامترهای معادله ون‌گنوختن بر اساس درصد ذرات خاک و خصوصیات

شن، درصد رس، چگالی ظاهری و مقدار ماده آلی وابستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که توابع پارامتریک و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک برآورد بهتری نسبت به توابع نقطه‌ای دارند. در برآورد پارامتریک معادلات ون‌گنوختن و بروکس و کوری نتایج حاکی از همبستگی بالای بین میزان برآورد شده و اندازه‌گیری شده رطوبت موجود در خاک است. به‌طور کلی می‌توان اظهار کرد که استفاده از درصد ذرات خاک برای دستیابی به توابع انتقالی در برآورد پارامترهای معادلات ون‌گنوختن، بروکس و کوری و مختصات نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک نسبت به برآورد نقطه‌ای نتایج بهتری را به دنبال داشت. در جدول (۲) و (۳) کلیه رطوبت‌ها بر حسب  $\text{gg}^{-۱}$  است.

توابع انتقالی بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک

جدول (۳) توابع نقطه‌ای و پارامتریک ارائه شده برای برآورد منحنی مشخصه آب خاک، پارامترهای معادلات ون‌گنوختن و بروکس و کوری، نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک و ضریب تبیین روابط را نشان می‌دهد. توابع نقطه‌ای و پارامتریک ارائه شده در سطح یک درصد معنی دارند. مقایسه مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توابع نقطه‌ای نشان‌دهنده همبستگی متوسط تا ضعیف این مقادیر است.

با توجه به شاخص‌های آماری جدول (۲) و (۳) می‌توان اظهار کرد که رطوبت برآورد شده توسط توابع انتقالی ایجاد شده بر اساس درصد ذرات خاک در برآورد نقطه‌ای رطوبت در مکش‌های مختلف نسبت به خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک نتایج بهتری را به دنبال داشته است. اما در برآورد پارامتریک معادلات ون‌گنوختن و بروکس کوری نتایج حاصل از توابع ایجاد

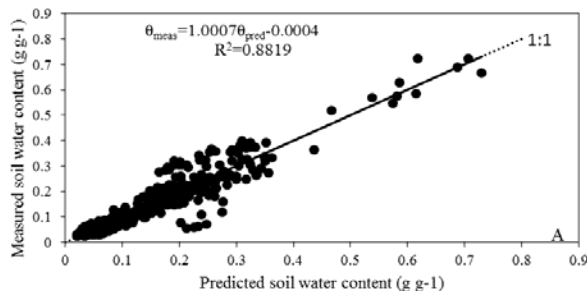
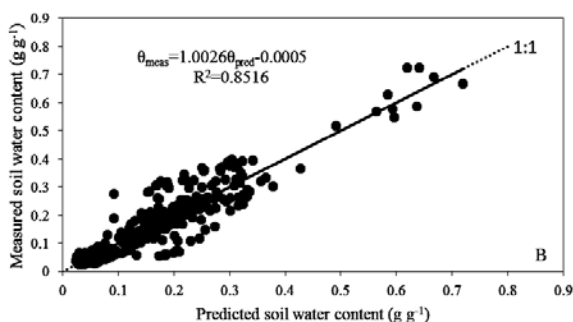
جدول ۳. توابع انتقالی نقطه‌ای، پارامتریک و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک

DV	Function	n	Sig	SE	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	d	NRMSE
$\theta_s$	$\frac{0/003}{d_g} - 0/004\sigma_g - 0/076OM + 0/03OM^2 - 1/04\text{Log}(BD) + 0/5$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۲۸۱	۰/۸۹۹۳	۰/۸۸۶	۰/۱۲۳۲
$\theta_{33}$	$57/7d_g^{-0/001} + e^{-2/65 + \frac{7/87}{\sigma_g}} - 0/05OM$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۰۴	۰/۷۵۸۷	۰/۷۲۴	۰/۱۰۹۸
$\theta_{50}$	$-1/7d_g + 7/8d_g^2 - 0/6\sigma_g + 0/002\sigma_g^2 - 0/03OM + 0/015OM^2 - 1/64 \times 10^2 e^{-46/3BD} + 0/76$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۰۸	۰/۷۸۲۵	۰/۷۴۲	۰/۱۲۷۱
$\theta_{100}$	$65/75d_g^{-0/001} + e^{-3/45 + \frac{12/99}{\sigma_g}} + 0/13OM^2/39$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۰۸	۰/۶۴۸۶	۰/۶۸۶	۰/۱۸۲۲
$\theta_{100}$	$-0/18OM - 16118/6e^{-11/35BD} - 24/97d_g^{-0/12} + 0/33e^{-0/12\sigma_g} + 0/043e^{0/25OM} - 4/8 \times 10^2 e^{-47/68BD}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۹۴	۰/۴۸۱۸	۰/۶۵۷	۰/۲۹۳۱
$\theta_{500}$	$0/18e^{-55/0d_g} + 0/35e^{-0/15\sigma_g} + 0/02e^{0/51OM} - 1/56BD^{-60/86}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲۸	۰/۵۸۰۷	۰/۶۸۶	۰/۳۰۵۵
$\theta_{v00}$	$0/003d_g^{-0/83} + 0/18e^{-0/13\sigma_g} + 0/005e^{0/71OM} - 0/001BD^{6/43}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۳۱	۰/۵۶۰۷	۰/۶۹۷	۰/۲۳۹۴
$\theta_{900}$	$0/006d_g^{-0/68} + 0/405e^{-0/16\sigma_g} - 0/06e^{-0/62OM} - 2/24BD^{-68/17}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲۵	۰/۶۰۰۲	۰/۶۹۹	۰/۲۲۷۲
$\theta_{1100}$	$\frac{0/001}{d_g} + 12/7e^{-0/0003\sigma_g} + 15/4e^{0/001OM} + 19/45BD^{-0/002} - 47/5$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۲۶	۰/۵۷۶	۰/۶۸۴	۰/۲۳۹۲
$\theta_{1300}$	$0/23e^{-76/6d_g} + 0/37e^{-0/18\sigma_g} + 0/006e^{0/58OM} - 147/58e^{-7/6BD}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۱۹	۰/۵۲۳۱	۰/۶۷۸	۰/۲۵۱۱
$\theta_{1500}$	$\frac{d_g^{-1/32}}{411/17e^{0/204\sigma_g} + 75/03e^{1/7OM} - 544/8BD^{4/6} + 0/025}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۱۱	۰/۵۷۷۴	۰/۶۷۹	۰/۲۳۳۳
$n_{(VG)}$	$5/2d_g - 28/2d_g^2 - \frac{1/85}{\sigma_g} - 0/28OM + 0/08OM^2 + 1/035\text{Log}(BD) + 1/48$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۲۸۳	۰/۹۰۹۳	۰/۸۲۳	۰/۰۴۷۲
$\alpha^*_{(VG)}$	$\frac{-0/02}{d_g} + 0/54\sigma_g - 0/016\sigma_g^2 - 1/5OM + 0/5OM^2 + e^{2/33 - \frac{1/8}{BD} - 1/66}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۱۶۷۲	۰/۹۰۵۱	۰/۶۹۰	۰/۱۹۰۸

ادامه جدول ۳.

$\theta_{r(VG)}$	$e^{-\left(\frac{1}{d_g} + \frac{0.0001}{d_g}\right)} + e^{-\left(\frac{-0.002 - 0.14}{\sigma_g}\right)} - 6/33e^{-0.001OM}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۵۷	۰/۸۱۲۲	۰/۷۵۵	۰/۱۹۸۵
$n(BC)$	$\frac{-0.002}{d_g} + 0.1 \text{Log}(\sigma_g) - 0.1OM + 0.2OM^2$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۹۹	۰/۹۱۴۷	۰/۸۹۵	۰/۱۲۱۰
$\alpha^*(BC)$	$\frac{0.09}{d_g} + 1/4\sigma_g + 0.05\sigma_g^2 - 4/7OM + 1/5OM^2$	۴۳	۰/۰۱	۰/۱۱۲	۰/۹۱۶۹	۰/۷۳۲	۰/۱۸۰۱
$\theta_{r(BC)}$	$e^{-\left(\frac{1}{d_g} + \frac{0.0001}{d_g}\right)} + e^{-\left(\frac{-0.001 - 0.14}{\sigma_g}\right)} - 6/33e^{-0.001OM}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۰۵۸	۰/۸۵۴۸	۰/۷۵۳	۰/۱۵۴۰
$\theta_c$	$e^{-\left(\frac{1}{d_g} + \frac{0.00018}{d_g}\right)} + e^{-\left(\frac{1}{\sigma_g} - \frac{0.24}{\sigma_g}\right)} - 12/4OM^{-0.001}$	۴۳	۰/۰۱	۰/۰۱۵۹	۰/۷۶۳۵	۰/۸۰۴	۰/۱۵۵۵
$\psi_c$	$253941/5d_g - 991682/4d_g^2 + \frac{49721}{\sigma_g} - 36413/1OM$	۴۳	۰/۰۱	۲۷۶۳/۲	۰/۸۵۵۹	۰/۸۲۴	۰/۱۰۴۱
	$+ 11429/4OM^2 - \frac{99633/5}{BD} + 111410/9$						

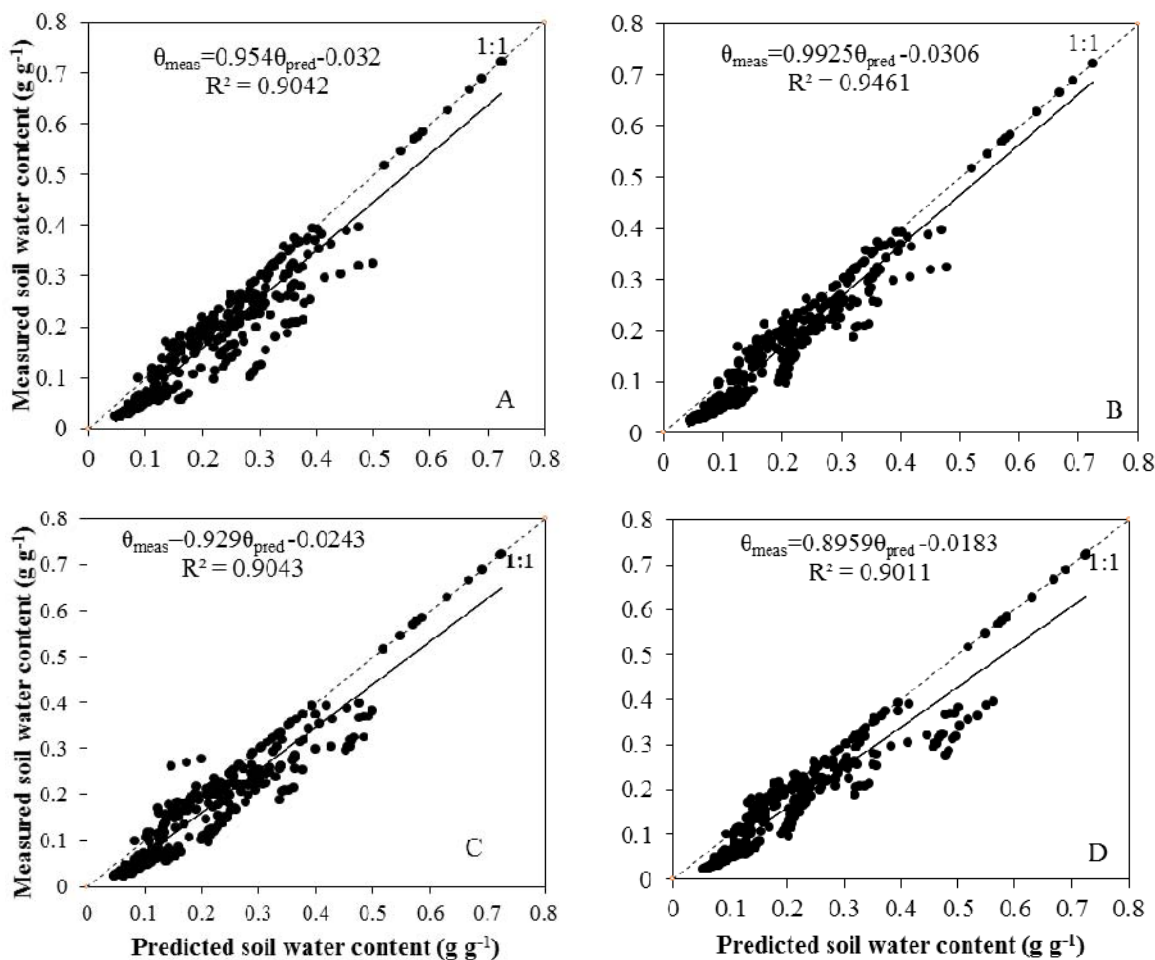
DV متغیر وابسته،  $d_g$  میانگین هندسی قطر ذرات خاک،  $\sigma_g$  انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، OM ماده آلی (%) و BD چگالی ظاهری ( $\text{gcm}^{-3}$ )



شکل ۳. روابط بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع نقطه‌ای بر اساس درصد ذرات خاک (A) و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک (B) در ایجاد توابع،  $\theta_{\text{meas}}$  رطوبت اندازه‌گیری شده ( $\text{gg}^{-1}$ ) و  $\theta_{\text{fit}}$  رطوبت برآورد شده ( $\text{gg}^{-1}$ )

داشت که کاربرد توابع پارامتریک ایجاد شده با استفاده از خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک برآورد بهتری از رطوبت موجود در خاک نسبت به توابع ایجاد شده با استفاده از درصد ذرات خاک در معادلات ون‌گنوختن و بروکس و کوری دارد.

هندسی قطر ذرات خاک و همچنین نمودار C و D به ترتیب مربوط به مقایسه برآورد به دست آمده از پارامترهای معادله بروکس و کوری بر اساس درصد ذرات خاک و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک است. با توجه به شکل (۴) می‌توان بیان



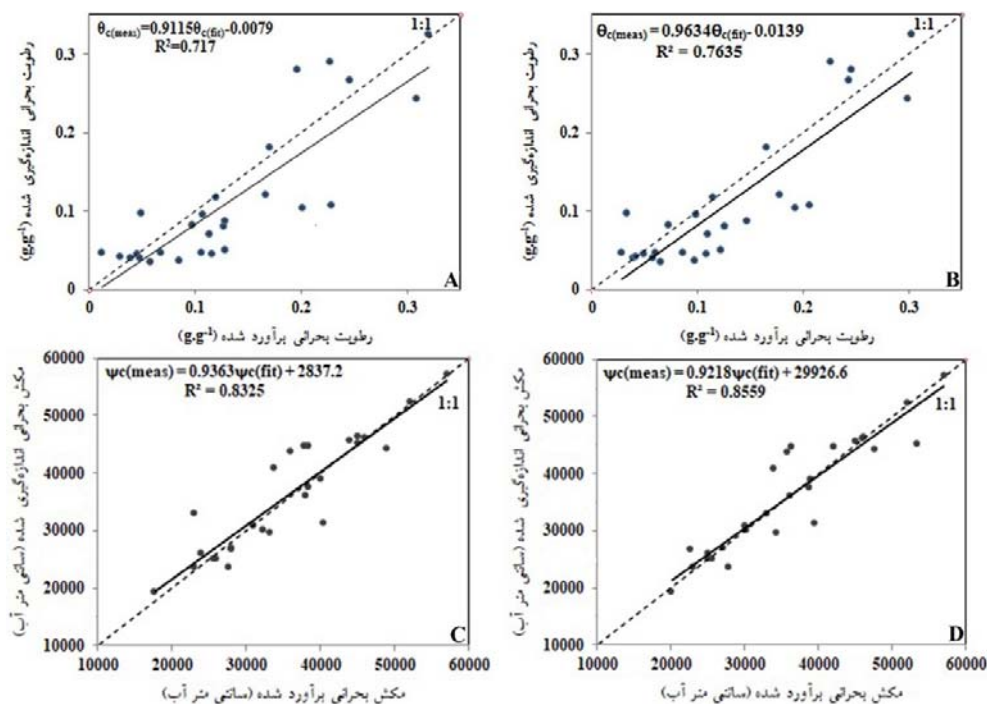
شکل ۴. رابطه بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع پارامتریک معادله ونگوختن بر اساس درصد ذرات خاک (A) و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک (B) و معادله بروکس و کوری بر اساس درصد قطر ذرات (C) و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک (D) در ایجاد توابع،  $\theta_{meas}$  رطوبت اندازه‌گیری شده ( $g\ g^{-1}$ ) و  $\theta_{pred}$  رطوبت برآورد شده ( $g\ g^{-1}$ )

می‌دهد که استفاده از توابع انتقالی ایجاد شده بر اساس درصد ذرات خاک برآورد بهتری نسبت به توابع ایجاد شده بر اساس خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک دارد.

#### اعتبارسنجی توابع انتقالی

نتایج سنجش اعتبار توابع ایجاد شده بر اساس درصد و خصوصیات هندسی ذرات خاک با ملاک‌های سنجشی  $R^2$ ،  $d$  و NRMSE در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج پارامترهای آماری برای داده‌های مستقل نشان داد که دقت توابع انتقالی

شکل (۵) همبستگی بین مقادیر رطوبت و مکش بحرانی برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع انتقالی بر اساس درصد ذرات خاک و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک را نشان می‌دهد. در این شکل نمودار A و B به ترتیب مربوط به مقایسه مقادیر رطوبت بحرانی برآورد شده و اندازه‌گیری شده بر اساس درصد ذرات خاک و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک و همچنین نمودار C و D به ترتیب مربوط به مقایسه مقادیر مکش بحرانی برآورد شده و اندازه‌گیری شده بر اساس درصد ذرات خاک و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک است. نتایج نشان



شکل 5. رابطه بین مقادیر رطوبت بحرانی برآورد شده و اندازه‌گیری شده بر اساس قطر ذرات خاک (A) و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک (B) و مکش بحرانی برآورد شده و اندازه‌گیری شده بر اساس درصد ذرات خاک (C) و خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک (D) در ایجاد توابع

جدول 4. نتایج اعتبارسنجی توابع ایجاد شده بر اساس درصد و خصوصیات هندسی ذرات خاک

خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک			درصد ذرات خاک			n	پارامتر وابسته
NRMSE	d	R <sup>2</sup>	NRMSE	d	R <sup>2</sup>		
0/10986	0/83555	0/8792	0/8693	0/8162	0/9066	11	θ <sub>s</sub>
0/12013	0/75976	0/7165	0/11243	0/8188	0/8125	11	θ <sub>33</sub>
0/19883	0/76233	0/7337	0/19725	0/78875	0/7371	11	θ <sub>50</sub>
0/25998	0/70231	0/7643	0/23652	0/81266	0/8139	11	θ <sub>100</sub>
0/19112	0/75235	0/7376	0/19123	0/79112	0/7772	11	θ <sub>200</sub>
0/20254	0/75111	0/8084	0/20146	0/85254	0/8101	11	θ <sub>500</sub>
0/23993	0/76254	0/6966	0/22962	0/78936	0/7685	11	θ <sub>1000</sub>
0/21111	0/73691	0/7709	0/21874	0/86169	0/8215	11	θ <sub>9000</sub>
0/23254	0/77914	0/7571	0/22778	0/88234	0/8316	11	θ <sub>11000</sub>
0/27423	0/75934	0/8215	0/22398	0/86435	0/8324	11	θ <sub>13000</sub>
0/16334	0/72036	0/7511	0/15342	0/76398	0/8093	11	θ <sub>15000</sub>
0/09123	0/89887	0/9012	0/09265	0/88265	0/8692	11	n(VG)
0/12784	0/81586	0/8828	0/14475	0/80892	0/8258	11	α*(VG)
0/10836	0/89912	0/8001	0/16852	0/85265	0/7321	11	θ <sub>r</sub> (VG)
0/09239	0/80312	0/8988	0/10128	0/80365	0/8801	11	n(BC)
0/11999	0/80701	0/8928	0/13826	0/73952	0/8069	11	α*(BC)
0/10124	0/78036	0/7999	0/14126	0/70396	0/7333	11	θ <sub>r</sub> (BC)
0/10562	0/73526	0/7186	0/10193	0/88692	0/8069	11	θ <sub>c</sub>
0/11369	0/91324	0/8318	0/12017	0/89369	0/8629	11	ψ <sub>c</sub>

آب خاک، تخمین بهتری در مقایسه با استفاده از خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک داشته است. درحالی که در برآورد پارامتریک و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک استفاده از خصوصیات هندسی قطر ذرات خاک نتایج رضایت بخش تری نسبت به کاربرد درصد ذرات خاک داشته است. مقادیر NRMSE در تخمین رطوبت برای مکش‌های پایین بین ۰/۱ تا ۰/۲ است که در مقایسه با مقادیر بیشتر از ۰/۲ برای مکش‌های بیشتر از ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان‌دهنده دقت بیشتر توابع انتقالی برای مکش‌های پایین است. درمورد کاربرد درصد ذرات خاک هم نتایج مشابه به دست آمده است و دقت برآورد رطوبت در مکش‌های پایین بیشتر از مکش‌های بالا بوده است. نتایج نشان می‌دهد که توابع پارامتریک مدل ونگنوختن مناسب‌تر از توابع انتقالی پارامتریک بروکس و کوری است که دلیل آن می‌تواند ناشی از برازش بهتر مدل ونگنوختن بر منحنی مشخصه نسبت به مدل بروکس و کوری باشد. نتایج مشابه با این نتایج توسط فولادمند و هادی‌پور (۱۳) گزارش شد. با توجه به نتایج یافته‌های فولادمند و هادی‌پور (۱۳) و گنجی آزادپور و همکاران (۱۴) مبنی بر کاربردی بودن توابع انتقالی به صورت منطقه‌ای و لزوم تعیین این توابع برای هر منطقه، نتایج این تحقیق می‌تواند برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک منطقه مورد مطالعه استفاده شود اما برای کاربرد آن در دیگر مناطق نیاز به واسنجی ضرایب و معادلات است.

به دست آمده در این تحقیق برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک به صورت پارامتریک و نقطه‌ای و همچنین تعیین نقطه بحرانی منحنی مشخصه مناسب است. با توجه به نتایج صحت سنجی توابع، می‌توان گفت به طور کلی توابع نقطه‌ای ایجاد شده بر اساس درصد ذرات خاک نسبت به توابع ایجاد شده بر اساس خصوصیات هندسی ذرات خاک برآورد نسبتاً بهتری از رطوبت موجود در خاک دارد. در برآورد پارامتریک معادلات ونگنوختن و بروکس و کوری و نقطه بحرانی منحنی مشخصه آب خاک استفاده از توابع ایجاد شده بر اساس خصوصیات هندسی ذرات خاک نسبت به درصد ذرات خاک نتایج بهتری را داشته است.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که توابع انتقالی ایجاد شده در این تحقیق بر اساس خصوصیات زود، یافت خاک، دقت قابل قبولی برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک به صورت پارامتریک، نقطه‌ای و تعیین نقطه بحرانی خاک‌های مورد آزمایش داشته است. با استفاده از این توابع می‌توان از صرف هزینه و وقت زیاد برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک جلوگیری کرد. به منظور کاربرد این توابع برای خاک‌های مناطق دیگر می‌بایست نسبت به واسنجی ضرایب این معادلات اقدام شود. نتایج نشان داد که استفاده از درصد ذرات تشکیل دهنده خاک (شن و رس)، چگالی ظاهری و ماده آلی در برآورد نقطه‌ای منحنی مشخصه

### منابع مورد استفاده

1. Aria, P. and R. Mirkhani. 2005. Methods for the Measurement of Physical Properties of Soil. Soil and Water Research Institute Publication. No. 479. Iran.
2. ASTM D3385-03. 2003. Standard Test Method for Infiltration Rate of Soil in Field Using Double-Ring Infiltrometer. ASTM International. PA. West Conshohocken. Available online at: [www.astm.org](http://www.astm.org).
3. ASTM D422. 1998. Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM International 63: 1-8. Available online at: [www.astm.org](http://www.astm.org).
4. Baybordi, M. 2003. Soil Physics. Seventh Edition. Tehran University Press. Tehran. Iran. (In Farsi).
5. Brooks, R. and A. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University. Fort Collins.
6. Campbell, G. S. and S. Shiozawa. 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. University of California. Riverside. CA.
7. Chong, C., H. Hu., K. Tusheng ren, Y. Liang and E. Arthur. 2017. A simple method for determining the critical point of the soil water retention curve. *Soil Science* 81: 250-258.

8. Ehyaei, M. and A. Behbahani Zadeh. 1993. Descriptions of methods for soil chemical analysis. *Soil and Water Research Institute Publication* 1(893): 127.
9. Farrokhian Firuzi, A. and M. Homae. 2003. Derivation of pedo-transfer functions of gypsiferous soils to predict pointy soil moisture characteristic curve. *In: Proceeding of the 8<sup>th</sup> Soil Science Congress of Iran*. Guilan University. Guilan. PP: 965-967.
10. Farrokhian Firuzi, A. and M. Homae. 2003. Parametric Estimation of hydraulic properties of gypsiferous soils using pedotransfer functions. *Journal of Agricultural Engineering Research* 4(15): 57-72.
11. Fisher, R. A. 1926. On the capillary forces in an ideal soil: correction of formulae given by WB Haines. *Journal of Agricultural Science* 16: 492-503.
12. Fooladmand, H. R. and E. Allasvand. 2015. Estimation of soil moisture characteristic curve based on simple one parameter model. *Journal of Soil and Water Resources Conservation* 5(1): 31-39.
13. Fooladmand, H. R. and S. Hadipour. 2012. Evaluation of parametric pedotransfer functions for estimating soil water characteristic curve in Fars province. *Journal of Water and Soil Science* 15(58): 25-37.
14. Ganji Azad Por, A., A. Rasoulzadeh and J. Azizi Mobser. 2016. Evaluating the ability of parametric pedotransfer functions for estimating the wetting branch of the soil water retention curve (case study: Boinzahra). *Irrigation Sciences and Engineering* 39(3): 107-119.
15. Ghorbani-Dashtaki, SH. and M. Homae. 2003. Parametric Estimation of unsaturated soil hydraulic properties using pedotransfer functions. *In: Proceeding of the 8<sup>th</sup> Soil Science Congress of Iran*. Guilan University. Guilan. PP: 1075-1078.
16. Khodaverdilo, H. and M. Homae. 2002. Derivation of pedo-transfer functions to predict soil moisture characteristic curve. *Journal of Agricultural Engineering Research* 3(10): 35-46.
17. Krumbein, W. C and F. J. Pettijohn. 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton- Century. Inc. New York.
18. Minasny, B., A. B. McBratney and K. L. Bristow. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma* 93: 225-253.
19. Mirkhani, R. and H. Khodaverdilo. 2006. Effect of geometric mean diameter and standard deviation of soil texture to predicting soil moisture coefficients. *Iranian Journal of Soil and Waters Sciences* 20(1): 54-63.
20. Rajkai, K., S. Kabos and M. T. Van Genuchten. 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil and Tillage Research* 79(2): 145-152.
21. Ramezani, M., B. Ghanbarian-Alavijeh, A. M., Liaghat and Sh. Salehi khoshkroudi. 2011. Developing pedotransfer functions for saline and saline-alkali soils. *Journal of Water and Irrigation Management* 1(1): 99-110.
22. Rezaei, A. and A. Soltani. 2004. *An Introduction to Applied Regression Analysis*. Isfahan University of Technology Publication Center. Isfahan.
23. Ryan, B. F. and B. L. Joiner. 1994. *Minitab Handbook*. Durbuy Press. Belgium.
24. Salazar, O., I. Wesstrom and A. Joel. 2008. Evaluation of drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management* 95: 1135-1143.
25. Salchow, E., R. Lal., N. R. Fausey and A. Ward. 1966. Pedotransfer functions for variable alluvial soil in southern ohio. *Geoderma* 73: 165-181.
26. Shirazi, M. A. and L. Borsma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal* 48: 142-147.
27. Van Genuchten, A. T., F. J. Leij and S. R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. United States Environmental Protection Agency, EPA/600/2-91/065.
28. Van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
29. Vereecken, H., J. Meas, J. Fegen and P. Davius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science Society of America Journal* 148 (6): 389-403.
30. Webb, S. W. 2000. A simple extension of tow-phase characteristic curves to include the dry region. *Water Resource Research* 36(6): 1425-1430.
31. Zhang, Z. F. 2011. Soil water retention and relative permeability for conditions from oven-dry to full saturation. *Journal of Vadose Zone* 10: 1299-1308.



## The Influence of Using Soil Particles Percentage in Comparison with Geometric Characteristics of Soil Particles on the Accuracy of the Pedotransfer Equations and the Critical Point of SWRC

A. Javidi, A. Shabani and M. J. Amiri<sup>\*</sup>

(Received: February 9-2018 ; Accepted: May 9-2018)

### Abstract

Soil water retention curve (SWRC) reflects different states of soil moisture and describes quantitative characteristics of the unsaturated parts of the soil. Direct measurement of SWRC is time-consuming, difficult and costly. Therefore, many indirect attempts have been made to estimate SWRC from other soil properties. Using pedotransfer functions is one of the indirect methods for estimating SWRC. The aim of this research was to assess the effect of using soil particles percentage in comparison with the geometric characteristics of soil particles on the accuracy of the pedotransfer equations of SWRC and the critical point of it. Accordingly, 54 soil samples of Isfahan province from seven texture classes were used. The most suitable functions for estimating SWRC, parameters of van Genuchten and Brooks-Corey equations, and the critical point of SWRC were selected based on statistical indices. The results indicated that the pedotransfer equations fitted the SWRC data well and the outputs from them were in a good agreement with the independent (validation) SWRC data. The results revealed that using soil particles percentage (sand and clay), bulk density and organic matter content in the point estimation of SWRC was better than applying geometric properties of the soil particle diameter. On the other hand, in the estimation of parametric and critical point of SWRC, using the geometric properties of soil particle diameters resulted in more satisfactory results, as compared with using the soil particles percentage. The NRMSE values indicated that the accuracy of the pedotransfer equations in the lower matric head was greater than that of the higher matric head.

**Keywords:** Soil water retention curve, Critical point, Point estimation, Parametric estimation

---

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Fasa University, Fasa, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: mj\_amiri@fasau.ac.ir