

برازش مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب خاک بر داده‌های تجربی در کلاس‌های بافتی متفاوت استان گیلان

حسین بیات^{1*}، عیسی ابراهیمی²، مصطفی راستگو³، حمید زارع ایبانه⁴ و ناصر دواتگر⁵

تاریخ دریافت: 91/04/18 تاریخ پذیرش: 91/10/24

¹ استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

² دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

³ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

⁴ دانشیار گروه آبیاری دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

⁵ استادیار گروه خاکشناسی مؤسسه تحقیقات برنج کشور

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.bayat@basu.ac.ir

چکیده

برای رشد گیاهان علاوه بر مقدار آب، پتانسیل ماتریک آب خاک نیز دارای اهمیت است. رابطه بین آن دو با عنوان منحنی مشخصه آب خاک بیان می‌شود. مدل‌های بسیاری برای توصیف منحنی مشخصه آب خاک و برازش بر داده‌های تجربی ارائه شده است اما به ندرت توانایی برازش آن‌ها در خاک‌های مختلف بررسی شده است. در این پژوهش 75 نمونه خاک سطحی و زیرسطحی از استان گیلان به صورت دست خورده و دست نخورده جمع‌آوری و بعد از تعیین بافت، به گروه‌های بافتی تفکیک شدند. مقدار رطوبت در 12 پتانسیل ماتریک مختلف اندازه‌گیری شد. تعداد 13 مدل معروف و پرکاربرد منحنی مشخصه آب خاک بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. دقیق‌ترین مدل یک بار برای کل داده‌ها، یک بار برای هر گروه بافتی و یک بار هم برای هر کلاس بافتی به تفکیک بر اساس معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین و میانگین خطا انتخاب شدند. در بین مدل‌ها مدل بروکس-کوری، کازوگی و گاردنر کمترین دقت را داشتند. این نتایج نشان داد که مدل‌های دکستر و فردلاند-زینگ با توجه به برتری نسبی در دقت پیش‌بینی در هر سه گروه کل داده‌ها، گروه‌های بافتی و در بیشتر کلاس‌های بافتی نسبت به مدل رایج ون‌گنوختن برای خاک‌های استان گیلان ارجح هستند. چون تفاوت معنی‌داری بین دو مدل دکستر و فردلاند-زینگ از نظر برازش آنها بر داده‌های تجربی با توجه به مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین وجود نداشت، مدل دکستر نسبت به دیگر مدل‌ها به علت سادگی شکل معادله برای استان گیلان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دقت برازش، کلاس‌های بافتی، مدل، منحنی مشخصه آب خاک

Fitting Different Soil Water Characteristic Curve Models on the Experimental Data of Various Textural Classes of Guilan Province Soils

H Bayat,^{1*} E Ebrahimi,² M Rastgo³, H Zare Abyaneh⁴ and N Davatgar⁵

Received: 8 July 2012 Accepted: 13 January 2013

¹ Assist. Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran.

² M.Sc. student of Soil Sci., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran

³ M.Sc. student of Soil Sci., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran

⁴ Assoc. prof., Dept. of Irrigation, Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran

⁵ Assist. Prof., Department of Soil Sci., Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran

* Corresponding Author Email: h.bayat@basu.ac.ir

Abstract

In addition to soil water content, soil matric potential is also important. Soil water characteristic curve (SWCC) describes soil water content and soil matric potential relationship. Many models have been developed to describe the SWCCs and their fitting to the experimental data. Their fitting accuracies in different soils, however, have been rarely investigated. In this study, 75 disturbed and undisturbed soil samples were taken from topsoils and subsoils of Guilan province and were partitioned into textural groups after textural measurements. Water contents were measured at 12 matric potentials. Thirteen well known and frequently applied SWCC models were fitted to the measured data. The most accurate models of total soil samples, each textural group and each textural class were determined using root mean square error, coefficient of determination and mean error. The Brooks and Corey, Kosugi and Gardner models had the least accuracies among all of the models. The results showed that Fredlund-Xing and Dexter models had better fitting accuracies than the van Genuchten model for total soil samples, textural groups and some of textural classes and showed superiority for the soils of Guilan province. Since, there was no significant difference between the fitting accuracies of the Fredlund-Xing and Dexter models on the empirical data, so Dexter model would be superior to the other models for the soils of Guilan province because of its simplicity.

Keywords: Fitting accuracy, Model, Soil water characteristic curve, Textural classes

(اوهیو و همکاران 1987). منحنی مشخصه آب خاک¹
 (SWCC) رابطه‌ی میزان رطوبت خاک با مکش ماتریک
 خاک را نشان می‌دهد. منحنی مشخصه آب خاک یک

مقدمه

برای بررسی رشد بهینه گیاه، علاوه بر مقدار
 آب، نیروهایی که آب را در خاک نگه داشته و نیز نقش
 مهمی در رشد گیاه دارند، دارای اهمیت زیادی هستند

¹ Soil water characteristic curve

منحنی فرض کرده است. در حالیکه در خاک‌های ریز بافت این شکست وجود ندارد. افراسیاب (1380) با واسنجی که در مدل کمپل انجام داد دریافت که این مدل در مکش‌های پایین صحیح تر از مکش‌های بالا عمل می‌کند. همچنین از آنجایی که مدل کمپل بر نقاط ابتدا و انتهای منحنی تطابق مناسب‌تری داشته است، استفاده از این مدل برای پیش بینی مقدار رطوبت در دو نقطه رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و پژمردگی دایم را توصیه کرد.

مدل ون‌گنوختن (1980) یکی از رایج ترین مدل‌ها برای تخمین SWCC است. زیرا شکل سیگموئیدی و پیوسته‌ای از منحنی را برآورد می‌کند. از مزایای این مدل می‌توان انعطاف‌پذیری بالا و استفاده از دامنه مکش‌های بالا و قابلیت برازش بر خاک‌های متفاوت را نام برد. همچنین پارامترهای این مدل مفهوم فیزیکی دارند.

مدل تحلیلی تانی (1982) دارای دو پارامتر برازشی است که بر موقعیت و شکل منحنی اثر دارند و نمی‌توان اثر هر پارامتر را به صورت مجزا از هم تشخیص داد. به همین علت برازش آن مشکل است. ولی انعطاف‌پذیری آن بالا است و یک منحنی پیوسته‌ای را ارائه می‌دهد (سیلرز و همکاران 2001).

مککی و بامب (1984) یک مدل نمایی با دو پارامتر برای SWCC ارائه کردند که به نام مدل بولتزمن¹ معروف شد. عیب مدل بولتزمن در این است که پارامترهای آن بر شکل و موقعیت منحنی اثر دارند و باعث افزایش نقاط حداقل موضعی در هنگام برازش منحنی می‌شوند و نمی‌توان اثر دو پارامتر بر منحنی را از هم تفکیک کرد. این موضوع باعث سختی برازش منحنی می‌شود (سیلرز و همکاران 2001). مدل بولتزمن نیز از نظر پارامترها و واحدها مشابه مدل بروکس-کوری بوده و یک منحنی پیوسته را تخمین نمی‌زند.

ویژگی پایه برای مطالعه آب قابل دسترس برای گیاه، پدیده‌های نفوذ، زهکشی، هدایت هیدرولیکی، آبیاری، تنش آبی گیاهان و حرکت مواد محلول در خاک است (کرن 1995، رومانو و چریکو 2004). برای به دست آوردن SWCC روش‌های مستقیم آزمایشگاهی بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر هستند و به همین دلیل از سال‌ها پیش پژوهشگران در پی دستیابی به روش‌های غیر مستقیم و کم هزینه‌تر برای پیش بینی بوده‌اند (اسولین و همکاران 1998، کمپل و شیوزاوا 1994). مدل‌های بسیاری برای SWCC توسط پژوهندگان مختلف ارائه شده است. از مهمترین این روش‌ها توابع انتقالی و مدل‌های تحلیلی هستند. از توابع انتقالی در سطح وسیعی استفاده می‌شود (لامبورسکیا و همکاران 2008، تاراکیا و همکاران 2009). اما بر پایه بررسی انجام شده تاکنون کارایی مدل‌های تحلیلی مورد مقایسه جامع قرار نگرفته است. این مدل‌ها ویژگی‌های مختلفی داشته و از نظر پارامترهای مربوطه نیز متفاوت می‌باشند. مدل گاردنر (1956) از اولین مدل‌های تحلیلی پیش بینی SWCC با چهار پارامتر است و حالت پیوسته‌ای از منحنی را ارائه می‌کند. مدل بروکس-کوری (1964) نیز از اولین مدل‌های ایجاد شده برای SWCC است، پارامترهای آن مفهوم فیزیکی دارند و اثر پارامترهای مدل را به سادگی می‌توان روی منحنی مشاهده کرد، اما این مدل منحنی پیوسته‌ای را ارائه نمی‌کند. سکی (2007) بیان کرد که مدل بروکس-کوری نسبت به مدل‌های ون‌گنوختن و کازوگی از اساس ریاضیاتی ساده‌تری برخوردار است.

کازوگی (1994) یک مدل تحلیلی پنج پارامتری SWCC که بر پایه تابع توزیع لاگ نرمال شعاع منافذ خاک استوار بود را ارائه کرد. پارامترهای این مدل نیز مفهوم فیزیکی داشته و نسبت به مدل‌های حاضر که بطور گسترده استفاده می‌شوند پیچیده‌تر بود.

کمپل (1974) مدل سه پارامتری را ارائه نمود که مکش نقطه‌ای ورود هوا به خاک را یک نقطه‌ی شکست

¹ Boltzman

خاکدانه‌های ریز ایجاد می‌شود و در نهایت تخلخل بزرگ که در اثر وجود منافذ درشت حاصل شده است، می‌باشد. بخش توده و ساختمانی اهمیت بیشتری نسبت به دو بخش دیگر دارند. چرا که در محدوده مکش‌های مورد بررسی در SWCC قرار دارند. این مدل برای شن-های خوب دانه‌بندی شده مناسب نیست، زیرا دامنه مکش و توزیع اندازه منافذ آنها بسیار کم است. البته این مشکل برای خاک‌های کشاورزی وجود ندارد.

در بسیاری از مطالعات برای پیش بینی منحنی مشخصه نگهداری آب در خاک از مدل ون‌گنوختن استفاده می‌شود (حق شناس گرگابی و بیگی هرچگانی 1389، هودنت و توماسلا 2002) بدون آنکه کارایی آن نسبت به دیگر مدل‌ها مقایسه شود. از سوی دیگر مدل‌های فیزیکی بسیاری برای توصیف SWCC و برازش بر داده‌های تجربی آن ارائه شده، اما به ندرت قابلیت برازش تعداد زیادی از آنها در خاک‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به همین علت کاربران هنگام استفاده از مدل‌های SWCC بالاترین بوده و اطلاعات اندکی در مورد انتخاب مدل مناسب برای خاک‌های مختلف دارند.

بنابراین اهداف این پژوهش عبارت بودند از: (1) انتخاب بهترین مدل برای خاک‌های استان گیلان (2) انتخاب بهترین مدل برای گروه‌های بافتی متفاوت و (3) بررسی اثر کلاس بافت خاک بر برازش مدل‌های مختلف.

مواد و روش‌ها

تعداد 75 نمونه خاک به صورت دست خورده و دست نخورده از خاک‌های استان گیلان جمع‌آوری شدند. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌های دست خورده هوا خشک شده و سپس از الک دو میلی-متر عبور داده شدند. بافت خاک نمونه‌ها به روش هیدرومتر (گی و ار 2002) و SWCC در مکش‌های صفر، 1، 2، 5، 10، 25، 50، 100، 200، 500، 1000

مککی و بامب (1987) یک مدل نمایی دیگر با نام مدل فرمی ارائه کردند که از مدل بولتزمن ساده‌تر و انعطاف پذیرتر بوده و یک منحنی پیوسته را ارائه می‌کند. اما مشکل هم پوشانی اثر پارامترها در این مدل نیز برطرف نشده است (سپیرلز و همکاران 2001).

فردلان-زینگ (1994) مدلی پنج پارامتری ارائه کردند که شباهت زیادی به مدل ون‌گنوختن دارد و بر دامنه وسیعی از مکش‌ها قابل برازش است.

همه مدل‌هایی که در بالا به آن اشاره شد تک نمایی¹ بودند، اما دورنر (1994) و سکی (2007) با ارائه مدل‌های دو نمایی با تعداد پارامترهای بیشتر نشان دادند که دقت برازش افزایش یافت. این مدل‌ها بر پایه توزیع ناهمسان منافذ خاک پایه‌ریزی شده‌اند. دورنر (1994) برای بیان مدل خود از مدل ون‌گنوختن به عنوان مدل پایه استفاده کرد. مدل سکی (2007) بر اساس مدل توزیع لاگ‌نرمال منافذ خاک استوار است. سکی (2007) با انجام مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های دورنر، ون‌گنوختن، بروکس-کوری و کازوگی مشاهده کرد که مدل سکی بر پایه ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)^2$ دارای بیشترین دقت بوده و به دنبال آن به ترتیب مدل‌های دورنر، ون‌گنوختن، کازوگی و بروکس-کوری قرار داشتند.

گرنوالد و گرنوت (2004) با ارائه یک مدل سه پارامتری که بر پایه معادله اسکوفیلد استوار است دامنه رطوبتی خاک از حالت اشباع تا آون خشک را مورد مطالعه قرار دادند.

دکستر و همکاران (2008) بر پایه این که تخلخل خاک از چهار بخش تشکیل شده است؛ مدل خود را ارائه کرد. این چهار بخش شامل تخلخل باقیمانده که نشان دهنده منافذ بسیار ریز خاک بوده و مقدار آن ناچیز است، تخلخل توده³ خاک که ناشی از وجود ذرات مجزای خاک است، تخلخل ساختمانی که به علت وجود

¹ Unimodal

² Root mean square error

³ Matrix porosity

آن‌ها این آماره نیز محاسبه گردید. برای محاسبه خطا از رابطه‌های زیر استفاده شد.

$$ME = \frac{\sum (q_{meas} - q_{fit})}{n} \quad [1]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (q_{meas} - q_{fit})^2}{n}} \quad [2]$$

θ_{meas} و θ_{fit} به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری و برازشی در مکش یکسان و n تعداد نقاط اندازه‌گیری هستند.

مدل‌ها در جداول بر اساس RMSE مرتب شده‌اند.

برای گروه‌بندی مدل‌ها از نظر آماره‌های R^2 و RMSE مقایسه میانگین بین مدل‌ها با آزمون دانکن با استفاده از نرم افزار ۲۰ SPSS انجام شد. یعنی متغیرهای مورد مقایسه آماره‌های R^2 و RMSE بودند. برای برازش مدل‌ها از نرم‌افزارهای مختلفی مانند RETC و Solver در نرم‌افزار Excel استفاده شد. همچنین برای رسم نمودارها از Excel و Minitab استفاده گردید. جعبه ابزار Solver در نرم افزار Excel قرار دارد و برای برازش معادلات آن استفاده می‌شود. RETC یک نرم افزار اختصاصی برای پیش‌بینی داده‌های SWCC است که در آن چندین مدل SWCC تعریف شده است. در این نرم افزار مدل‌ها برازش داده شده و تمام پارامترهای هر مدل به عنوان خروجی مشخص می‌گردد. در واقع تمامی پارامترهای مدل‌ها از جمله مدل ون‌گونختن به عنوان پارامترهای برازشی در نظر گرفته شدند.

و 1500 کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری¹ و جعبه شن² (دن و جان 2002) اندازه‌گیری شد. سیزده مدل SWCC بر داده‌های آزمایشگاهی هر نمونه خاک برازش داده شدند. روابط و پارامترهای این مدل‌ها در جدول شماره 1 نشان داده شده است. با توجه به اینکه واحد رطوبت خاک در کلیه مدل‌ها به جز مدل دکستر بر حسب جزء حجمی است، جهت یکنواختی با سایر مدل‌ها رطوبت جرمی برازش شده توسط مدل دکستر به رطوبت حجمی تبدیل گردید و سپس آماره‌های خطا محاسبه شد.

گروه‌بندی خاک‌ها به دو صورت انجام شد: 1- کل 75 نمونه‌ها به دو گروه بافتی ریز (رسی و رسی سیلتی) و متوسط (لوم سیلتی، لوم رسی، لوم رسی سیلتی و لوم) بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) تقسیم شدند و 2- نمونه‌ها بر اساس کلاس‌های بافتی به شش کلاس لومی سیلتی، لوم رسی، لوم رسی سیلتی، رس سیلتی، رسی و لومی تفکیک شدند. انتخاب مدلی با بالاترین دقت برازش بر پایه آماره‌های RMSE، ضریب تبیین³ (R^2) و میانگین خطا⁴ (ME) برای سه حالت کل خاک‌ها، هر گروه بافتی و هر کلاس بافتی با متغیر گرفتن رطوبت حجمی انجام شد. آماره ME برای نشان دادن بیش‌برازشی یا کم‌برازشی مدل‌هاست. به همین دلیل برای رتبه‌بندی مدل‌ها از آن استفاده نشد. از طرفی چون R^2 در ارزیابی اعتبار مدل‌ها می‌تواند فریب دهنده باشد و R^2 نزدیک 1 الزاما دلالت بر انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده نیست. یعنی بالا بودن R^2 دلیلی بر کمتر بودن خطا نیست (بوچان و همکاران 1993، کزاک و همکاران 1996). به همین دلیل ترتیب مدل‌ها بر حسب کم بودن RMSE مرتب شد، ولی چون در غالب مطالعات از R^2 استفاده می‌شود، برای مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج

¹ Pressure plate

² Sand box

³ Coefficient of determination

⁴ Mean of error

جدول 1- ویژگی‌های مدل‌های استفاده شده در این مطالعه.

تعداد پارامتر	پارامترها	تابع	مدل
4	$\theta_r, \theta_s, \alpha, n$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + \alpha \omega^n} \right)$	گاردنر (1956)
4	$\theta_r, \theta_s, \alpha, \lambda$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\phi}{\alpha} \right)^{-\lambda}$	بروکس - کوری (1964)
3	$\theta_s, \lambda, \phi_e$	$\phi = \phi_e \left(\frac{\theta_s}{\theta} \right)^\lambda$	کمپل (1974)
5	$\theta_r, \theta_s, \alpha, n, m$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{(1 + (\alpha\phi)^n)^m} \right)$	ون گنوختن (1980)
4	$\theta_r, \theta_s, \alpha, n$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{\alpha - \phi}{\alpha - n} \right) \exp \left(- \frac{\alpha - \phi}{\alpha - n} \right)$	تانی (1982)
4	$\theta_r, \theta_s, \alpha, n$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp \left(\frac{\alpha - \phi}{n} \right)$	بولتزن (مکی و بامب) (1984)
4	$\theta_r, \theta_s, \alpha, n$	$q = q_r + (q_s - q_r) \left(\frac{1}{1 + \exp \left(\frac{y - a}{n} \right)} \right)$	فرمی (مکی و بامب) (1987)
5	$\theta_s, \alpha, n, m, \phi_r$	$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\text{Ln}(1 + \frac{\phi}{\phi_r})}{\text{Ln}(1 + \frac{10^6}{\phi_r})} \left[\frac{1}{\text{Ln}(e + (\frac{\phi}{\alpha})^n)} \right]^m \right)$	فردلان - زینگ (1994)
7	$\theta_r, \theta_s, w, \alpha_1, n_1, \alpha_2, n_2$	$S_e = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (ay)^{n_i}} \right]^{m_i}$ ($0 < w_i < 1, \sum w_i = 1$)	دورنر (1994)
5	$\theta_r, \theta_s, \psi_c, \psi_b, \sigma$	$S_e = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{y_c - y}{y_c - y_o} \right) - s^2}{2^{\frac{1}{2}} s} \right)$	کازوگی (1994)
4	θ_{wp}, k_0, k_1, n	$\theta(h) = \theta_{wp} + k_1 \left(\exp \left(\frac{-k_0}{15000^n} \right) - \exp \left(\frac{-k_0}{h^n} \right) \right)$	گرنوالت - گرت (2004)
7	$\theta_r, \theta_s, w, \psi_{m1}, \sigma_1, \psi_{m2}, \sigma_2$	$S_e = \sum_{i=1}^k w_i Q \left[\frac{\ln \left(\frac{y}{y_i} \right)}{s_i} \right]$ $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt$	سکی (2007)
5	$c, A_1, \psi_1, A_2, \psi_2$	$w = c + A_1 e^{\left(\frac{-y}{y_1} \right)} + A_2 e^{\left(\frac{-y}{y_2} \right)}$	دکستر و همکاران (2008)

در تمامی مدل‌ها θ رطوبت حجمی خاک، θ_s رطوبت اشباع در مکش صفر، θ_r رطوبت باقیمانده در مکش 1500 کیلو پاسکال و ψ مکش خاک (کیلو پاسکال) را نشان می‌دهند. در مدل گاردنر پارامتر a در ارتباط با مکش ورود هوا به خاک و هم واحد مکش است. در مدل بروکس - کوری پارامتر λ شاخص توزیع اندازه منافذ خاک است. در مدل کازوگی پارامتر S_e اشباع موثر، $erfc$ تابع خطای مکمل، ψ_c, ψ_b, σ پارامترهای برازشی مدل هستند. در مدل کمپل ψ_e مکش ورود هوا به خاک و λ شیب $SWCC$ است. در مدل ون گنوختن، پارامتر a معکوس مکش ورود هوا به خاک و پارامتر n در ارتباط با توزیع اندازه منافذ خاک و m پارامتر عدم تقارن مدل است. در مدل تانی پارامتر a در ارتباط با مکش ورود هوا به خاک و هم واحد مکش است و پارامتر m مکش در نقطه عطف منحنی است. در مدل فرمی پارامتر a برابر با مکش خاک در حالتی که درجه اشباع موثر برابر با 0/5 باشد. در مدل فردلان - زینگ پارامتر n است که در ارتباط با توزیع اندازه منافذ خاک بوده و m عدم تقارن مدل را نشان می‌دهد. واحد پارامتر a در مدل فردلان - زینگ مشابه مکش است اما مقدار آن از مکش ورود هوا به خاک بزرگتر بوده و برابر با نقطه انحنای منحنی می‌باشد. ψ_r مکش خاک در رطوبت باقیمانده است. در مدل گرنوالت - گرت θ_{wp} مقدار رطوبت اندازه گیری شده در نقطه‌ی پژمردگی دائم، k_0, k_1 و n پارامترهای برازشی مدل و ψ_m مکش خاک را بر حسب سانتی متر نشان می‌دهد. مدل دکستر یک مدل دو نمایی بوده و از سه عبارت تشکیل

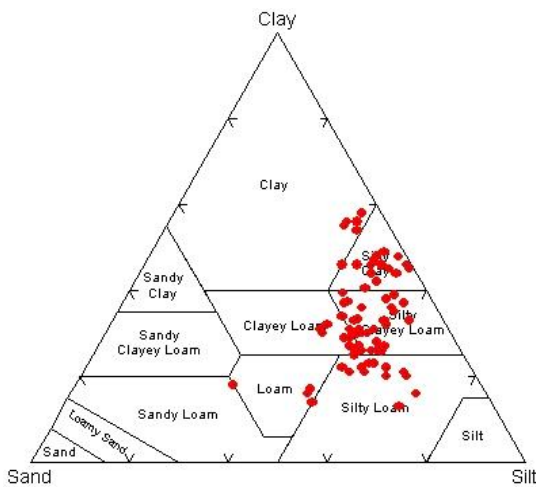
شده است. عبارت اول مجانب منحنی و با علامت c نشان داده شده است. اگر مکش به سمت بینهایت میل کند ($\Psi \rightarrow \infty$) c برابر با رطوبت باقیمانده خواهد بود. در عبارت دوم معادله A_1 مربوط به بخش توده خاک است و در عبارت سوم معادله A_2 به بخش ساختمانی خاک مربوط می‌شود. Ψ بیانگر مکش (hPa) است. Ψ_1 و Ψ_2 به ترتیب مکشی که در هر بخش توده و ساختمانی آب شروع به تخلیه می‌کند را نشان می‌دهند، که مقدار $\Psi_1 > \Psi_2$ است. w بیانگر رطوبت جرمی خاک است.

نتایج و بحث

نیست (گیمنز و همکاران 2001). در این مطالعه نیز بیشتر خاک‌های مطالعه شده دارای بافت متوسط و سنگین بودند.

برتری مدل سکی نسبت به مدل دورنر در تخمین SWCC با یافته‌های حاصل از پژوهش سکی (2007) هماهنگی دارد.

توزیع بافتی نمونه خاک‌های مطالعه شده در نمودار مثلث بافت خاک نشان داده شده است. بیشتر خاک‌ها در کلاس‌های بافتی متوسط تا سنگین قرار دارند. بافت لوم رسی بیشترین تعداد، برابر با 26 نمونه را به خود اختصاص داده است. نمونه‌های مطالعه شده در شش کلاس و دو گروه بافتی قرار گرفتند (شکل 1). مقایسه میانگین آماره‌های مدل‌ها در برازش منحنی مشخصه آب خاک برای کل نمونه‌های خاک در جدول 2 نشان داده شده است. همانگونه که در بالا اشاره شد مرتب سازی مدل‌ها در جداول بر اساس RMSE است. مدل‌های دکستر و فردلاند-زینگ در بالاترین سطح دقت از نظر RMSE و R^2 قرار دارند و نتایج حاصل از مقایسه میانگین نیز بین این دو مدل تفاوت معنی‌داری در سطح 5 درصد نشان نداده است. مدل‌های گاردنر، کازوگی و بروکس - کوری در بین مدل‌های استفاده شده دقت ضعیفی در برازش بر داده‌های تجربی از خود نشان دادند و در نتایج حاصل از مقایسه میانگین نیز این سه مدل از نظر آماره RMSE تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نشان نداده‌اند. ولی تفاوت آن‌ها با سایر مدل‌ها از نظر RMSE و R^2 معنی‌دار بود. دقت کم مدل بروکس - کوری در برازش را می‌توان به این صورت بیان کرد که، هر اندازه منافذ یکنواخت‌تر باشند مقدار پارامتر λ (که نشان دهنده توزیع اندازه منافذ است) بزرگتر و با افزایش مقدار λ ، شیب SWCC در قسمت غیر اشباع بیشتر خواهد شد. مدل بروکس - کوری برای خاک‌های درشت بافت با اندازه منافذ یکنواخت تر نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. اما در نزدیکی نقطه اشباع به خصوص در خاک‌های سنگین بافت نتایج آن مناسب



شکل 1- توزیع نمونه خاک‌های مورد مطالعه در مثلث بافت خاک.

شاید علت برتری مدل سکی، ارتباط مستقیم پارامترهای آن با توزیع اندازه منافذ باشد که از توزیع دو نمایی لوگ-نرمال تبعیت می‌کند (سکی 2007). دو مدل سکی و دورنر به ترتیب رتبه ششم و دهم را در بین سیزده مدل مورد بررسی در این تحقیق از نظر RMSE به دست آوردند. مدل‌های مذکور به صورت دو نمایی هستند، این احتمال وجود دارد که بخشی از خاک‌های مطالعه شده نیز دارای توزیع اندازه منافذ دو نمایی باشند. با وجود اینکه این دو مدل دارای تعداد پارامترهای بیشتر در بین کلیه مدل‌ها می‌باشند و غالباً (اما نه همیشه) با افزایش تعداد پارامترها دقت برازش

تجربی استفاده شده است. پتیل و همکاران (2012) با مطالعه خاک‌های ورتیسول هند نشان دادند که مدل کمپل در مقایسه با مدل‌های ون‌گنوختن و بروکس - کوری برتری داشته است. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که مدل ون‌گنوختن نسبت به مدل بروکس - کوری نیز برتری دارد. نتایج بدست آمده از پژوهش پتیل و همکاران (2012) با نتایج حاصل از این پژوهش تطابق دارد.

اعداد داخل پرانتز در جداول نشان دهنده انحراف استاندارد آماره‌ها می‌باشند. انحراف استاندارد هر آماره، پراکنندگی آن را نشان می‌دهد. مدل کمپل دارای کمترین مقدار پراکنندگی در RMSE های بدست آمده (0/026) است. بعداً از مدل کمپل به ترتیب مدل‌های فردلانند - زینگ و دکستر قرار دارند. انحراف استاندارد هر آماره مورد بررسی (RMSE، R^2 و ME) سه مدل گاردنر، کازوگی و بروکس - کوری در بین مدل‌های استفاده شده افزایش قابل توجهی داشت. مدل کازوگی بیشترین انحراف استاندارد مربوط به RMSE (0/135) را دارد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل کمپل بر همه نمونه‌ها به خوبی برازش شده و از نظر RMSE در کلاس a قرار گرفته است. در صورتیکه مدل‌های گاردنر، کازوگی و بروکس - کوری برای برخی نمونه‌ها دقت برازش خوبی داشته و برای برخی دیگر دقت برازش ضعیفی نشان دادند و در کل میانگین دقت پایینی نیز داشتند.

آماره ME بیش‌برازشی یا کم‌برازشی مدل‌ها را برای کل داده‌ها نشان می‌دهد (جدول 2). مدل‌های فردلانند - زینگ، تانی، فرمی، ون‌گنوختن و دورنر بیش‌برازشی و دیگر مدل‌ها کم‌برازشی نشان دادند. بیش‌برازشی یا کم‌برازشی هر مدل را می‌توان بر اساس شکل SWCC و در مکش‌های مختلف مورد بررسی دقیق‌تر قرار داد.

مدل از نظر معیار R^2 بر داده‌های تجربی افزایش می‌یابد (خلوصی و همکاران 2008)، هرچند که سهولت استفاده از مدل کاهش می‌یابد (بوچان و همکاران 1993)، ولی در این تحقیق دقت رضایت بخشی برای کل داده‌ها نداشتند. سکی (2007) نشان داده است که مدل‌هایی مانند ون‌گنوختن، بروکس - کوری و کازوگی برای خاک‌هایی که توزیع اندازه منافذ همگن دارند مناسب هستند، اما در خاک‌هایی که این توزیع ناهمگن باشد مدل‌های دو نمایی مانند سکی و دورنر نتایج مناسب‌تری ارائه می‌کنند. مدل کمپل از نظر معیار RMSE در سطح متوسطی از دقت نسبت به دیگر مدل‌ها قرار دارد اما میانگین R^2 آن برابر با 0/841 است که در بین دیگر مدل‌ها دقت پایینی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل کمپل با نتایج نبی زاده و بیگی هرچگانی (1390) مطابقت دارد. مدل کمپل به همراه مدل گرنوالت - گرنت از کمترین تعداد پارامتر در بین مدل‌های مطالعه شده برخوردار هستند، ولی نسبت به مدل‌های سکی و دورنر که بیشترین پارامترها را دارند دقت بیشتری از نظر آماره RMSE داشتند که این تفاوت‌ها با مدل دورنر در سطح 5 درصد معنی‌دار بود. بین دو مدل کمپل و گرنوالت - گرنت تفاوت معنی‌داری در سطح 5 درصد مشاهده نگردید. ولی خلوصی و همکاران (2008) مقدار آماره RMSE متفاوت را برای دو مدل گزارش کردند. فولادمند و هادی‌پور (2011) مدل گرنوالت - گرنت را برای خاک‌های استان فارس با استفاده از دو گروه از توابع انتقالی و اسنجی کردند و این مدل را برای خاک‌های این استان توصیه نمودند. معیار RMSE بدست آمده از پژوهش فولادمند و هادی‌پور (2011) نسبت به نتایج این پژوهش ضعیف‌تر بوده است که علت آن می‌تواند ناشی از عدم قطعیت توابع انتقالی استفاده شده توسط این محققین در برآورد پارامترهای مدل گرنوالت - گرنت باشد. اما در این پژوهش از داده‌های

جدول 2. دقت برازش مدل‌ها برای پیش‌بینی SWCC برای کل نمونه‌های خاک.

مدل	RMSE (cm ³ /cm ³)	R ²	ME (cm ³ /cm ³)
دکستر ^a	0/021(0/043) ^a	0/968(0/119) ^a	0/004(0/030)
فردلاند - زینگ	0/025(0/039) ^a	0/974(0/023) ^a	-0/006(0/031)
گرنوالت - گرن	0/040(0/096) ^{ab}	0/958(0/049) ^a	0/006(0/056)
کمپل	0/041(0/026) ^{ab}	0/841(0/086) ^b	0/002(0/008)
تانی	0/055(0/054) ^{abc}	0/933(0/038) ^a	-0/009(0/046)
سکی	0/067(0/067) ^{bcd}	0/989(0/027) ^a	0/015(0/068)
بولتزمان (مکی و بامب)	0/072(0/059) ^{bcd}	0/961(0/068) ^a	0/013(0/067)
فرمی (مکی و بامب)	0/091(0/107) ^{bcd}	0/914(0/105) ^a	-0/070(0/123)
ون‌گنوختن	0/094(0/079) ^{bcd}	0/956(0/081) ^a	-0/033(0/060)
دورنر	0/120(0/079) ^{cd}	0/831(0/100) ^b	-0/014(0/107)
بروکس - کوری	0/291(0/125) ^e	0/602(0/281) ^c	0/239(0/151)
کازوگی	0/292(0/135) ^e	0/477(0/250) ^d	0/262(0/130)
گاردنر	0/308(0/116) ^e	0/506(0/217) ^c	0/268(0/126)

a. ترتیب مدل‌ها بر اساس RMSE می‌باشد. حروف لاتین در جدول نتایج مقایسه میانگین‌ها را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف لاتین مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار (در سطح 5 درصد) بین مدل‌ها از نظر دقت برازش آن‌ها بر داده‌های تجربی منحنی مشخصه آب خاک است. اعداد داخل پرانتز انحراف استاندارد را نشان می‌دهند.

همکاران (2001) و نبی زاده و بیگی هرچگانی (1390) مشابه بود. مدل کمپل نسبت به مدل بروکس - کوری به‌طور معنی‌داری دقت بیشتری داشت که این نتیجه با نتایج حاصل از پژوهش انجام شده توسط نبی زاده و بیگی هرچگانی (1390) هماهنگی دارد.

مدل ون‌گنوختن در دو گروه ریز و میان بافت در بین دیگر مدل‌ها رتبه یکسانی از نظر دقت داشت اما در گروه میان بافت نسبت به ریز بافت دقت بالاتری از نظر هر دو آماره R² و RMSE داشت. دقت مدل‌ها برای هر یک از کلاس‌های بافتی در جدول 4 نشان داده شده است. در بیشتر کلاس‌ها مدل دکستر از دقت بالایی برخوردار بود و به دنبال آن مدل‌های فردلاند-زینگ و گرنوالت-گرن قرار گرفتند. در برخی از کلاس‌ها نیز مدل فردلاند-زینگ بالاترین دقت را از نظر آماره RMSE از خود نشان داد. هر چند تفاوت میان این سه مدل برتر در هیچ‌کدام از کلاس‌های بافتی معنی‌دار نبود.

نتایج برازش مدل‌ها برای دو گروه ریز و متوسط بافت در جدول 3 نشان داده شده است. در نمونه‌های ریز بافت مدل‌های فردلاند-زینگ و دکستر در بالاترین سطح دقت قرار گرفته‌اند. در این گروه بافتی، سه مدل گاردنر، بروکس - کوری و کازوگی دارای کمترین دقت در بین مدل‌ها هستند و تفاوت معنی‌داری در سطح 5 درصد با سایر مدل‌ها داشتند. در نمونه‌های میان بافت مدل دکستر، گرنوالت-گرن و فردلاند-زینگ دارای بالاترین دقت برازش هستند. این مدل‌ها از نظر هر دو آماره R² و RMSE در یک گروه قرار گرفتند. احتمالاً برتری مدل دکستر به دلیل فیزیکی بودن پارامترهای آن است. در خاک‌های میان بافت باز سه مدل بروکس - کوری، کازوگی و گاردنر در پایین‌ترین سطح دقت برازش قرار گرفته‌اند و از نظر هر دو آماره R² و RMSE تفاوت معنی‌داری در سطح 5 درصد با سایر مدل‌ها داشتند.

دقت برازش ضعیف مدل بروکس - کوری در خاک‌های میان بافت و ریز بافت با نتایج گیمنز و

جدول 3- مقایسه دقت برازش مدل‌ها برای پیش‌بینی SWCC در دو گروه ریز و میان بافت خاک.

میان بافت				ریز بافت			
ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مدل	ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مدل
0/000 (0/000)	0/964(0/139) ^a	0/015(0/014) ^a	دکستر	0/000 (0/000)	0/973(0/022) ^a	0/020(0/016) ^a	فردلاند - زینگ
0/002(0/016)	0/961(0/052) ^a	0/024(0/026) ^{ab}	گرنات - گرت	0/000 (0/000)	0/977(0/019) ^a	0/020(0/018) ^{ab}	دکستر
-0/009(0/036)	0/973(0/023) ^a	0/027(0/044) ^{ab}	فردلاند - زینگ	0/001(0/001)	0/840(0/080) ^b	0/044(0/024) ^{abc}	کپل
0/002(0/009)	0/839(0/087) ^b	0/040(0/027) ^{ab}	کپل	-0/020(0/046)	0/923(0/051) ^{ab}	0/053(0/053) ^{abcd}	تانی
-0/004(0/045)	0/936(0/032) ^a	0/055(0/055) ^{bc}	تانی	0/016(0/052)	0/927(0/131) ^{ab}	0/063(0/052) ^{abcd}	بولتزمن (مککی و بامب)
0/016(0/062)	0/986(0/033) ^a	0/064(0/065) ^c	سکی	0/015(0/082)	0/996(0/004) ^a	0/072(0/073) ^{abcd}	سکی
0/012(0/071)	0/971(0/022) ^a	0/075(0/060) ^c	بولتزمن (مککی و بامب)	0/015(0/104)	0/951(0/039) ^{ab}	0/083(0/173) ^{abcd}	گرنات - گرت
-0/059(0/103)	0/931(0/079) ^a	0/076(0/090) ^c	فرمی (مککی و بامب)	0/007(0/107)	0/852(0/062) ^b	0/107(0/068) ^{bcd}	دورنر
-0/033(0/056)	0/966(0/057) ^a	0/086(0/076) ^c	ون‌گوشتن	-0/031(0/072)	0/927(0/126) ^{ab}	0/116(0/086) ^{cd}	ون‌گوشتن
-0/020(0/107)	0/823/823(0/112) ^b	0/125(0/085) ^d	دورنر	-0/103(0/161)	0/874(0/145) ^{ab}	0/129(0/136) ^d	فرمی (مککی و بامب)
0/235(0/159)	0/591(0/296) ^c	0/290(0/126) ^e	بروکس - کوری	0/225(0/177)	0/531(0/275) ^{cd}	0/287(0/122) ^e	گاردنر
0/266(0/126)	0/475(0/240) ^d	0/290(0/135) ^e	کازوگی	0/249(0/133)	0/629(0/243) ^c	0/293(0/125) ^e	بروکس - کوری
0/289(0/109)	0/489(0/204) ^d	0/321(0/112) ^e	گاردنر	0/252(0/138)	0/482(0/289) ^d	0/297(0/135) ^e	کازوگی

a. ترتیب مدل‌ها بر اساس RMSE می‌باشد. حروف لاتین در جدول نتایج مقایسه میانگین‌ها را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف لاتین مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار (در سطح 5 درصد) بین مدل‌ها از نظر دقت برازش آن‌ها بر داده‌های تجربی مشخصه آب خاک است. اعداد داخل پرانتز انحراف استاندارد را نشان می‌دهند.

جدول 4- رقت برآزش مدل‌ها برای پیش‌بینی SWCC در کلاس‌های بافت خاک.

لوم رسی		رسی					
ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مدل	ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مدل
0/000 (0/000)	0/981(0/007) ^a	0/014(0/003) ^a	فردلانگ - زینگ	0/000 (0/000)	0/982(0/012) ^a	0/012(0/008) ^a	دکستر
0/000 (0/000)	0/961(0/043) ^a	0/019(0/011) ^a	دکستر	0/000 (0/000)	0/970(0/016) ^a	0/015(0/009) ^a	فردلانگ - زینگ
0/000 (0/000)	0/961(0/037) ^a	0/019(0/008) ^a	گرنولت - گرنیت	0/000 (0/000)	0/872(0/076) ^{bc}	0/028(0/000) ^a	کپیل
0/000 (0/000)	0/937(0/040) ^a	0/025(0/008) ^a	تانی	-0/017(0/027)	0/899(0/047) ^a	0/047(0/035) ^a	تانی
0/001(0/000)	0/822(0/009) ^{abc}	0/039(0/003) ^{ab}	کپیل	0/022(0/046)	0/994(0/002) ^a	0/049(0/028) ^a	سکی
-0/026(0/035)	0/947(0/058) ^a	0/039(0/033) ^{ab}	فرمی (مککی و بامب)	-0/021(0/063)	0/828(0/165) ^{bc}	0/063(0/039) ^{ab}	فرمی (مککی و بامب)
-0/015(0/049)	0/980(0/015) ^a	0/052(0/028) ^{ab}	بولتزمن (مککی و بامب)	0/025(0/053)	0/917(0/159) ^a	0/066(0/064) ^{abc}	بولتزمن (مککی و بامب)
-0/009(0/027)	0/993(0/009) ^a	0/070(0/029) ^{ab}	سکی	-0/002(0/056)	0/821(0/052) ^{bc}	0/069(0/031) ^{abc}	دورنر
0/003(0/044)	0/872(0/176) ^{ab}	0/078(0/037) ^{ab}	ون‌گونختن	-0/002(0/059)	0/938(0/055) ^a	0/096(0/073) ^{abc}	ون‌گونختن
-0/020(0/056)	0/702(0/151) ^c	0/097(0/023) ^b	دورنر	0/050(0/197)	0/939(0/051) ^a	0/205(0/295) ^{bcd}	گرنولت - گرنیت
0/221(0/072)	0/769(0/236) ^{bc}	0/236(0/051) ^c	بروکس - کوری	0/160(0/115)	0/816(0/160) ^{bc}	0/210(0/081) ^{cd}	بروکس - کوری
0/214(0/119)	0/423(0/105) ^d	0/252(0/098) ^{cd}	گاردنر	0/232(0/131)	0/607(0/230) ^c	0/245(0/128) ^d	کازوگی
0/277(0/066)	0/472(0/127) ^d	0/297(0/053) ^{cd}	کازوگی	0/162(0/245)	0/724(0/245) ^{bc}	0/259(0/149) ^d	گاردنر

ادامه جدول 4

رِس سبیلی		لوم					
ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مطل	ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مطل
0/000 (0/000)	0/975(0/025) ^a	0/023(0/018) ^a	فردلاند - زینگ	0/000 (0/000)	0/980(0/016) ^a	0/016(0/011) ^a	دکستر
0/000 (0/000)	0/975(0/021) ^a	0/023(0/020) ^a	دکستر	0/000 (0/000)	0/973(0/018) ^a	0/021(0/010) ^a	فردلاند - زینگ
0/000 (0/000)	0/956(0/034) ^{ab}	0/030(0/020) ^a	گرنولت - گرنولت	0/000 (0/000)	0/966(0/004) ^a	0/022(0/003) ^a	گرنولت - گرنولت
0/002(0/001)	0/822(0/023) ^d	0/053(0/082) ^{ab}	کمپل	0/000 (0/000)	0/935(0/045) ^{ab}	0/033(0/020) ^a	ثانی
-0/021(0/053)	0/933(0/051) ^{ab}	0/056(0/061) ^{ab}	ثانی	-0/032(0/042)	0/957(0/054) ^{ab}	0/042(0/044) ^a	بولتزمن (مککی و بامب)
0/025(0/053)	0/917(0/159) ^{ab}	0/066(0/064) ^{abc}	بولتزمن (مککی و امب)	0/001(0/000)	0/784(0/103) ^b	0/045(0/015) ^a	کمپل
0/012(0/096)	0/997(0/005) ^a	0/083(0/086) ^{abcd}	سکی	-0/196(0/069)	0/940(0/020) ^{ab}	0/176(0/057) ^{ab}	فرمی (مککی و بامب)
-0/045(0/076)	0/922(0/152) ^{ab}	0/126(0/094) ^{bcd}	ونگوختن	-0/111(0/084)	0/994(0/000) ^a	0/193(0/129) ^{ab}	ونگوختن
-0/138(0/178)	0/893(0/138) ^{ab}	0/158(0/153) ^{cd}	فرمی (مککی و بامب)	0/253(0/036)	0/661(0/073) ^{bc}	0/265(0/022) ^b	گاردنر
0/176(0/122)	0/846(0/064) ^d	0/192(0/074) ^d	دورنر	0/366(0/251)	0/413(0/169) ^c	0/379(0/233) ^c	کلزوی
0/267(0/111)	0/403(0/219) ^d	0/305(0/107) ^e	گاردنر	0/323(0/000)	0/772(0/000) ^b	0/411(0/000) ^c	بروکس - کوری
0/261(0/145)	0/420(0/304) ^d	0/322(0/137) ^e	کلزوی	-	-	-	سکی
0/294(0/122)	0/536(0/226) ^d	0/334(0/126) ^e	بروکس - کوری	-	-	-	دورنر

ادامه جدول 4.

لوم سیلتی			لوم رس سیلتی				
ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مدل	ME (cm ³ /cm ³)	R ²	RMSE (cm ³ /cm ³)	مدل
0/000 (0/000)	0/144(0/325) ^a	0/017(0/015) ^a	دکستر	0/000 (0/000)	0/945(0/202) ^{ab}	0/012(0/015) ^a	دکستر
0/000(0/001)	0/966(0/021) ^a	0/028(0/017) ^a	گرنولت - گرنولت	-0/004(0/023)	0/955(0/071) ^{ab}	0/023(0/034) ^{ab}	گرنولت - گرنولت
-0/009(0/040)	0/977(0/016) ^a	0/030(0/045) ^{ab}	فرولاند - زینگ	0/010(0/038)	0/970(0/030) ^{ab}	0/027(0/050) ^{ab}	فرولاند - زینگ
-0/005(0/032)	0/943(0/028) ^a	0/051(0/041) ^{ab}	ثانی	-0/001(0/001)	0/870(0/077) ^{bc}	0/028(0/022) ^{ab}	کمپل
-0/011(0/028)	0/970(0/028) ^a	0/053(0/043) ^{ab}	ونگوختن	-0/012(0/058)	0/991(0/021) ^a	0/044(0/063) ^{ab}	سکی
0/005(0/015)	0/807(0/086) ^b	0/057(0/031) ^{ab}	کمپل	0/038(0/082)	0/938(0/060) ^{ab}	0/063(0/067) ^{bc}	فرمی (مکی و بامب)
0/025(0/073)	0/980(0/044) ^a	0/080(0/073) ^b	سکی	0/005(0/059)	0/932(0/035) ^{abc}	0/067(0/068) ^{bc}	ثانی
-0/069(0/123)	0/917(0/106) ^a	0/084(0/114) ^b	فرمی (مکی و بامب)	-0/019(0/069)	0/970(0/024) ^{ab}	0/074(0/060) ^{bcd}	بولتزمن (مکی و بامب)
0/012(0/080)	0/973(0/018) ^a	0/085(0/069) ^b	بولتزمن (مکی و بامب)	0/048(0/062)	0/975(0/022) ^a	0/102(0/086) ^{cd}	ونگوختن
0/008(0/104)	0/830(0/128) ^b	0/136(0/075) ^c	نورنر	0/041(0/116)	0/840(0/081) ^c	0/122(0/099) ^d	نورنر
0/318 (0/148)	0/617(0/213) ^c	0/358(0/121) ^d	بروکس - کوری	-0/208(0/110)	0/541(0/260) ^d	0/229(0/121) ^e	کازوگی
0/332(0/113)	0/391(0/226) ^d	0/364(0/122) ^d	کازوگی	-0/153(0/147)	0/590(0/334) ^d	0/229(0/109) ^e	بروکس - کوری
0/344(0/078)	0/458(0/200) ^d	0/387(0/080) ^d	گاردنر	-0/264(0/121)	0/511(0/230) ^d	0/287(0/123) ^f	گاردنر

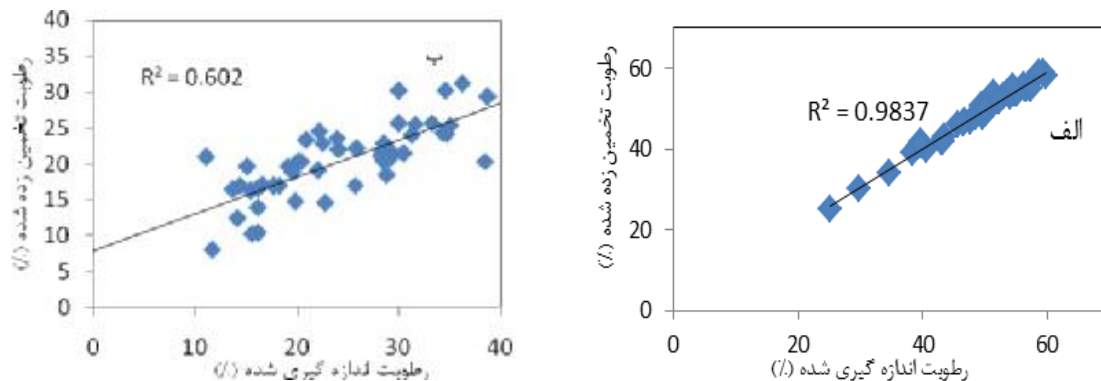
۳. ترتیب مدل‌ها بر اساس RMSE می‌باشد. حروف لاتین در جدول نتایج مقایسه میانگین‌ها را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف لاتین مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار (در سطح 5 درصد) بین مدل‌ها از نظر دقت برازش آن‌ها بر داده‌های تجربی منحنی مشخصه آب خاک است. اعداد داخل پرانتز انحراف استاندارد را نشان می‌دهند.

نمونه‌های رسی مدل کمپل، ون‌گنوختن و بروکس کوری به ترتیب دارای بالاترین RMSE بودند، که با نتایج این مطالعه هماهنگی دارد. خلوصی و همکاران (2008) بیان کردند که نتایج مدل گرنوالت - گرنت در حالتی که تعداد نقاط مشاهده‌ای نزدیک ناحیه اشباع کم باشد دقت مدل افزایش خواهد یافت. در اغلب بافت‌ها سه مدل بروکس - کوری، گاردنر و کازوگی کمترین دقت را از نظر آماره RMSE نشان دادند که به جز کلاس‌های بافتی رسی و لومی در سایر بافت‌های مورد بررسی این تفاوت در سطح 5 درصد معنی‌دار بود. در مقایسه با سایر کلاس‌های بافتی در کلاس لوم سیلتی دقت مدل ون - گنوختن افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت و رتبه این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها بهبود یافت. در خاک‌های لوم دو مدل سکی و دورنر بر داده‌های تجربی برآزش نشدند.

رابطه‌ی بین مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و برآزش شده توسط مدل ون‌گنوختن برای دو مکش 1 و 1000 کیلوپاسکال به ترتیب در شکل‌های 2 الف و ب نشان داده شده است. مدل ون‌گنوختن در رطوبت‌های بالا دقت بیشتری در برآزش بر داده‌های تجربی نسبت به رطوبت کم دارد. راس و همکاران (1991) نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند.

سکی (2007) بیان کرد که آماره RMSE که معیاری از تلفیق اریب¹ و دقت است در مدل‌های ون - گنوختن و کازوگی به صورت معنی‌داری کمتر از مدل بروکس - کوری بوده است. اما تفاوت معنی‌داری بین دو مدل ون‌گنوختن و کازوگی وجود نداشته است. در این پژوهش در میان کلاس‌های بافتی بررسی شده به جز بافت رسی مدل ون‌گنوختن تفاوت معنی‌داری در سطح 5 درصد از نظر آماره RMSE با دو مدل کازوگی و بروکس - کوری داشت. ولی تفاوت معنی‌داری بین دو مدل بروکس - کوری و کازوگی مشاهده نگردید. سکی (2007) بیان کرد که در بعضی خاک‌ها، به ویژه برای خاک‌هایی که مکش ورود هوا به خاک در آنها سریع رخ می‌دهد مدل بروکس - کوری می‌تواند از پیش‌بینی بهتری نسبت به دو مدل کازوگی و ون‌گنوختن برخوردار باشد. شاید به علت میان بافت و ریز بافت بودن خاک‌های مورد بررسی در این تحقیق باشد که نتایج برآزش بهتری توسط مدل ون‌گنوختن نسبت به مدل بروکس - کوری به دست آمده است. چرا که در این خاک‌ها مکش ورود هوا به سرعت رخ نمی‌دهد. مدل کمپل در غالب کلاس‌های بافتی دقت متوسط تا خوب را از نظر آماره RMSE نشان داد و در تمام کلاس‌های بافتی در گروه a از نظر این آماره قرار گرفت. هر چند از نظر آماره R^2 غالباً در گروه b قرار گرفت. این مدل در بیشتر کلاس‌های بافتی با توجه به آماره ME کم‌برآزشی نشان داد. مانیام و همکاران (2007) دو مدل ون‌گنوختن و کمپل را در خاک‌های شنی نیجریه مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل کمپل از نظر دقت برآزش بهتر از مدل ون‌گنوختن بوده است. در این مطالعه نیز نتیجه مشابهی از نظر آماره RMSE به دست آمد. هر چند تفاوت‌ها در بیشتر کلاس‌های بافتی معنی‌دار نبود. ولی از نظر آماره R^2 در بیشتر کلاس‌های بافتی مدل ون‌گنوختن نتایج بهتری نسبت به مدل کمپل داشت. در مطالعه پتیل و همکاران (2012) در بخش

¹ Bias



شکل 2. دقت برازش نقاط رطوبتی اندازه گیری شده و تخمینی (cm^3/cm^3) در مدل ون گنوختن: الف) در مکش 1 کیلوپاسکال و ب) در مکش 1000 کیلوپاسکال.

مدل ون گنوختن نسبت به مدل بروکس - کوری نتایج دقیق تری را نشان داد و از نظر R^2 و RMSE برتری معنی داری دارد. نتایج ضعیف مدل‌های دو نمایی سکی و دورنر را شاید بتوان به توزیع اندازه منافذ در خاک‌های مورد مطالعه ارتباط داد. دو مدل سکی و دورنر در خاک‌های لوم به داده‌های تجربی برازش نشدند. مدل ون گنوختن در خاک‌های لوم سیلتی دقت بالایی را نشان داد. همچنین مدل ون گنوختن در رطوبت‌های بالا دقت تخمین بالاتری نسبت به رطوبت‌های کم دارد. نتایج نشان داد که سه مدل دکستر، فردلاندر - زینگ و گرنوالتر - گرننت با توجه به برتری در دقت پیش‌بینی نسبت به مدل رایج ون گنوختن می‌توانند برای خاک‌های استان گیلان پیشنهاد شوند.

نتیجه‌گیری کلی

بیشتر مدل‌های مطالعه شده دارای دقت مناسبی برای پیش‌بینی منحنی مشخصه نگهداری آب خاک بودند. مدل‌های دکستر، فردلاندر - زینگ و گرنوالتر - گرننت بالاترین دقت را داشتند و نتایج مقایسه میانگین نشان داد که غالباً تفاوت معنی‌داری بین این سه مدل وجود ندارد. احتمالاً دقت بالای مدل دکستر به دلیل پنج پارامتری و فیزیکی بودن پارامترهای آن است. مدل‌های بروکس - کوری، کازوگی و گاردنر در غالب حالت‌های مورد مطالعه دقت پایینی داشتند و غالباً تفاوت آن‌ها با سایر مدل‌ها معنی‌دار بود. این سه مدل دارای بیشترین پراکندگی در RMSE و R^2 هستند. مدل کمپل نتایجی در سطح متوسط از دقت نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه کرد.

منابع مورد استفاده

- افراسیاب پ، 1380. تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل کمپل در منطقه ورامین. مجله پژوهش و سازندگی شماره 61. صفحه‌های 53-58.
- حق شناس گرگابی م و بیگی هرچگانی ح، 1389. اثر ژئولیت میانه بر ظرفیت نگهداری آب و ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی دو بافت خاک شنی و لوم رسی. مجله پژوهش آب ایران. سال چهارم، شماره 6. صفحه‌های 35-42.
- نبی زاده الف و بیگی هرچگانی ح، 1390. کیفیت برازش چند مدل تجربی منحنی رطوبتی به خاک‌های شهرستان لردگان از استان چهارمحال بختیاری. نشریه آب و خاک، جلد 25، شماره 3. صفحه‌های 634-645.

- Assouline S, Tessier D, and Bruand A, 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resour Res* 34: 223–231.
- Buchan GD, Grewal KS and Robson AB, 1993. Improved models of particle-size distribution: An illustration of model comparison techniques. *Soil Sci Soc Am J* 57:901-908.
- Brooks R and Corey A, 1964. Hydraulic properties of porous media, Hydrology Paper No. 3. Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Campbell GS, 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci* 117: 311-314.
- Campbell GS and Shiozawa S, 1994. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. Pp. 317–328. In: van Genuchten MTh et al. (eds). *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, USA.
- Dane JH and Jan WH, 2002. Water retention and storage. Pp. 671-717. In: Dane JH and Topp GG. (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical methods*. Soil Sci Soc Am J. Madison, Wisconsin USA.
- Dexter AR, Czyz EA, Richard G and Reszkowska A, 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma* 143: 143-253.
- Durner W, 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res* 30: 211–223.
- Fooladmand HR and Hadipour S, 2011. Parametric pedotransfer functions of a simple linear scale model for soil moisture retention curve. *African Journal Of Agriculture Research*. 6(17): 4000-1004.
- Fredlund DG and Xing A, 1994. Equations for the soil water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521-532
- Gardner W, 1956. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. Pp. 78-87. *International Symposium on Physico Chemical Phenomenon in Soils*. Washington DC.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle size analysis. Pp. 255-295. In: Warren, AD (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. SSSA Madison, WI.
- Gimenez D, Rawls WJ, Pachepsky Y and Watt JPC, 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil Sci* 166: 79-88.
- Groenevelt PH and Grant CD, 2004. A new model for the soil water retention curve that solves the problem of residual water contents. *European Journal of Soil Science* 55: 479-485.
- Hodent MG and Tomasella J, 2002. Water retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer functions developed for tropical soils. *Geoderma* 108: 155-180.
- Kern JS, 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Sci Soc Am J* 59: 1134-1141.
- Khlosi M, Cornelis WM, Douaik AM, Van Genuchten MT and Gabriels D, 2008. Performance evaluation of models that describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. *Vadose Zone Journal* 7:87-96.
- Kosugi K, 1994. Three parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resour Res* 30: 891–901.
- Kozak E, Pachepsky Y. A, Sokolowski S, Sokolowska Z. and Stepniewski W, 1996. A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Sci. Am. J.* 60: 1291 – 1297.
- Lamorskia K, Pachepsky Y, Slawinski C and Walczak RT, 2008. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland. *Soil Sci Soc Am* 72:1243-1247.
- Manyame C, Morgan CL, Heilman JL, Fatondji D, Gerad B and Payne WA, 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma* 141: 407-415.
- McKee C and Bumb A, 1984. The importance of unsaturated low parameters in designing a hazardous waste site. Pp. 50-58. *Hazardous Wastes And Environmental Emergencies Hazardous Materials Control Research Institute National Conference*. March Houston, TX.
- McKee C and Bumb A, 1987. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. *SPE Formation Evaluation*. 599-608.
- Ohu JO, Raghavan GSV, Prasher S, Mehuys G, 1987. Prediction of water retention characteristics from soil compaction data and organic matter content. *J Agric Engng Res* 38: 27-35.
- Patil NG, Pal DK, Mandal C and Mandal DK, 2012. Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural network approach to estimate AWC. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138: 1-10.

- Romano N and Chirico FB, 2004. The role of terrain analysis in using and developing pedotransfer functions. Pp. 273–290. In: Pachepsky Ya, Rawls WJ. (eds). Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Elsevier, Boston, Heidelberg, London
- Ross PJ, Williams J and Bristow KL, 1991. Equations for extending water retention curves to dryness. Soil Sci Soc Am J 55: 923-927.
- Sillers WS, Fredlund DG, and Zakerzadeh N, 2001. Mathematical attributes of some soil water characteristic curve models. Geotechnical and Geological Engineering 19: 243-283
- Seki K, 2007. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. Hydrol Earth Syst Sci Discuss 4: 407–437.
- Tani M, 1982. The properties of a water-table rise produced by a one dimensional, vertical, unsaturated flow (in Japanese with an English summary). Journal of Japan for Society 64: 409-418.
- Twarakavia NKC, Simunek J and Schaap MG, 2009. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. Soil Sci Soc Am J 73:1443-1452.
- van Genuchten MTh, 1980. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Soc Am J 44: 892-898.