



Estimation of soil water characteristic curve parameters in different models in light soils

Jahangir Abedi Koupai^{1*}, Nahid Pourabdollah², Shahab Ansari³

¹ Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran.

² Ph.D, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture Isfahan University of Technology, Iran.

³ Ph.D, Department of Water Science and Engineering,, College of Agriculture Isfahan University of Technology, Iran.

Received: 29.10.2023; Accepted:25.01.2023

Abstract

In addition to soil water content, soil matric potential is also important for plant growth. 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. However, their fitting accuracies in different soil textures, have been rarely investigated. In this study, matric potential-moisture data of 16 soil sample of forest station in Finland use to fit SWCC models. Nine 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 estimated using root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2) and mean error (ME). Result showed that van Genuchten-Mualem, van Genuchten, Gardner and Brutsaert models had most accurate and Brooks and Corey model had least accurate to predict SWCC.

Keywords: Soil texture, SWCC, Fitting models.

* . Corresponding author, E-mail: koupai@yahoo.com

Cite this article: Jahangir Abedi Koupai, Nahid Pourabdollah, Shahab Ansari. (2024). Estimation of soil water characteristic curve parameters in different models in light soils. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), 137-148. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.434088.1060>





بر آورد پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک در مدل‌های مختلف در خاک‌های سبک

جهانگیر عابدی کوپایی^۱، ناهید پور عبدالله^۲، شهاب انصاری^۳

استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. Email: koupai@cc.iut.ac.ir

^۲ دکترای آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. Email: Nahid7760@yahoo.com

^۳ دکترای آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. Email: Ansari.sh65@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵

چکیده

برای رشد گیاهان علاوه بر مقدار آب، پتانسیل ماتریک آب خاک نیز دارای اهمیت است. رابطه بین این دو با عنوان منحنی مشخصه آب خاک بیان می‌شود. مدل‌های بسیاری برای توصیف منحنی مشخصه آب خاک براساس داده‌های تجربی ارائه شده است اما به ندرت توانایی آن‌ها در تخمین منحنی مذکور برای بافت خاک‌های مختلف بررسی شده است. در پژوهش حاضر از اطلاعات مکش-رطوبت، ۱۶ نمونه خاک در اطراف ایستگاه جنگلی در مرکز فنلاند استفاده شده است. تعداد ۹ مدل معروف و پرکاربرد منحنی مشخصه آب خاک بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. دقیق‌ترین مدل یک مرتبه برای کل داده‌ها و یک مرتبه برای هر گروه بافتی بر اساس معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین و میانگین خطا انتخاب شد. نتایج نشان داد مدل‌های ون گنوختن-معلم، ون گنوختن، گاردنر و براتسارت به ترتیب بیشترین و مدل بروکس-کوری کمترین دقت را در تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک داشتند.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، منحنی رطوبتی خاک، مدل‌های ون گنوختن-معلم، ون گنوختن، گاردنر و براتسارت.

نویسنده مسئول: E-mail: koupai@yahoo.com

استناد: عابدی کوپایی، جهانگیر؛ پور عبدالله، ناهید؛ انصاری، شهاب (۱۴۰۳). برآورد پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک در مدل‌های مختلف در خاک‌های سبک. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۳(۱)، ۱۴۸-۱۳۷. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.434088.1060>

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس. © نویسندگان



مقدمه

منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWCC) رابطه‌ای بین فشار مویینگی و درصد رطوبت خاک می‌باشد. از این منحنی در طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، تعیین زمان آبیاری و مسایل مربوط به حرکت آب در خاک چه در حالت اشباع و چه در حالت غیر اشباع استفاده فراوانی می‌شود. همچنین از روی این منحنی می‌توان به چگونگی نگهداری آب در خاک پی برده و مقدار آب قابل ذخیره در خاک را در هر پتانسیل به‌دست آورد. تعیین منحنی رطوبتی از طریق اندازه‌گیری کاری پرهزینه، مشکل و وقت‌گیر است، لذا کاربرد مدل‌های مختلف برای تخمین این منحنی مورد توجه متخصصین آب و خاک است. 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. (Fouladmand and Hadipour, 2011) بیان کردند یکی از روش‌های مهم بررسی رفتار سیستم آب و خاک، تعیین منحنی‌های رطوبتی آنهاست. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که توابع پارامتریک مدل ونگنوختن مناسب‌تر از توابع انتقالی بروکس-کوری و کمپل می‌باشد که از دلایل آن برازش بهتر مدل ونگنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری شده است. مدل گاردنر از اولین مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی SWCC با چهار پارامتر است و حالت پیوسته‌ای از منحنی مذکور را ارائه می‌کند (Gardner, 1956). مدل بروکس-کوری نیز از اولین مدل‌های ایجاد شده برای تخمین منحنی مشخصه خاک 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 (Brooks and Corey, 1964). Campbell (1974) مدل سه پارامتری را ارائه نمود که مکش نقطه ورود هوا به خاک را یک نقطه شکست منحنی فرض کرده است، در حالی که در خاک‌های ریز بافت این شکست وجود ندارد. (Gupta and Larson, 1979) دوازده معادله رگرسیونی که مقدار آب خاک را در پتانسیل‌های ماتریک مشخص از ۴- تا ۱۵۰۰- کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های دست نخورده تخمین می‌زدند ارائه دادند. van Genuchten (1980) یکی از رایج‌ترین مدل‌ها برای

تخمین SWCC است، شکل سیگموئیدی و پیوسته‌ای از منحنی را برآورد می‌کند. از مزایای این مدل می‌توان انعطاف‌پذیری زیاد و استفاده از دامنه مکش‌های زیاد و قابلیت برازش بر خاک‌های متفاوت را نام برد. همچنین پارامترهای این مدل مفهوم فیزیکی دارند. Vereecken et al (1989) آزمایشهایی بر روی خاک‌های بلژیک از بافت ریز تا درشت انجام داده و پارامترهای مدل ونگنوختن را با استفاده از خصوصیات پایه‌ای خاک بر روی منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده تخمین زدند و از نتایج به‌دست آمده رضایت داشتند. مدل تحلیلی (Tani, 1982) دارای دو پارامتر برازشی است که بر موقعیت و شکل منحنی اثر دارند، لیکن نمی‌توان اثر هر پارامتر را به صورت مجزا از هم تشخیص داد. به همین علت برازش آن مشکل است. ولی انعطاف‌پذیری آن زیاد است و یک منحنی پیوسته را ارائه می‌دهد. (McKee and Bumb, 1984) یک مدل نمایی با دو پارامتر برای SWCC ارائه کردند که به نام مدل بولتزمن 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.

همه مدل‌هایی که در بالا به آن اشاره شد تک نمای بودند، اما (Durner, 1994) و (Seki, 2007) با ارائه مدل‌های دو نمایی با تعداد پارامترهای بیشتر نشان دادند که دقت برازش افزایش خواهد یافت. این مدل‌ها بر پایه توزیع ناهمسان منافذ خاک پایه‌ریزی شده‌اند. (Durner, 1994) برای بیان مدل خود از مدل ونگنوختن به عنوان مدل پایه استفاده کرد. مدل سکی براساس مدل توزیع لگ نرمال منافذ خاک استوار است. (Seki, 2007) با انجام مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های دورنر، ونگنوختن، بروکس-کوری و کازوگی مشاهده کرد که مدل سکی بر پایه ریشه میانگین مربعات خطا دارای بیشترین دقت بوده و به دنبال آن به ترتیب مدل‌های دورنر، ونگنوختن، کازوگی و بروکس-کوری قرار داشتند. (Bayram et al, 2016) از ۱۰ مدل مختلف به منظور انتخاب بهترین مدل برای تخمین منحنی مشخصه خاک در خاک‌های رسی، لوم رسی و لوم شنی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که تمام مدل‌ها به جز

منحنی رطوبتی کاربردهای زیادی در زمینه کشاورزی (تخمین مقدار آب قابل دسترس برای گیاه) و محیط زیست (مدلسازی جریان آب در منطقه غیراشباع چه به صورت مزرعه‌ای و چه به صورت آزمایشگاهی دارد. اخیراً در پژوهش‌های مربوط به پوشش گیاهی و تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از تغییر آب و هوا، توزیع مکانی منحنی رطوبتی خاک به عنوان یک مولفه مهم مطرح شده است. بنابراین کاربردهای فراوان بیان شده، پژوهشگران را مجاب به ارائه مدل‌های مختلف برای برآورد این منحنی نموده است. باید در نظر داشت هر یک از این مدل‌ها دارای پارامترها و ضرایب مختص به خود هستند که نیازمند واسنجی بوده و در شرایط مختلف تغییر می‌نمایند.

بنابراین هدف این پژوهش انتخاب بهترین مدل برای گروه‌های بافتی متفاوت و بررسی اثر کلاس بافت خاک بر برازش مدل‌های مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از اطلاعات منحنی مشخصه رطوبتی، منحنی دانه‌بندی خاک، چگالی ظاهری و تخلخل ۱۶ نمونه خاک که در اطراف ایستگاه جنگلی هیتیا در مرکز فنلاند اندازه‌گیری شده، استفاده شد (Kozak et al 1996). اکثر نمونه‌های اندازه‌گیری شده دارای بافت درشت می‌باشد که در قالب چهار بافت خاک شامل چهار نمونه شنی، چهار نمونه لوم شنی، چهار نمونه شن لومی و چهار نمونه سیلتی لومی دسته بندی شده‌اند. مشخصات مهم فیزیکی نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. انتخاب مدلی با بیشترین دقت برازش بر پایه آماره‌های RMSE، ضریب تبیین R^2 و میانگین خطا ME برای دو حالت در نظر گرفتن کل خاک‌ها و در نظر گرفتن هر کلاس بافتی به طور جداگانه با متغیر گرفتن رطوبت حجمی انجام شد. آماره ME برای نشان دادن بیش برازشی یا کم برازشی مدل‌ها به کار رفت، 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 ۱ الزاماً دلالت بر انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی نیست. به عبارت دیگر بالا بودن R^2 دلیلی بر کمتر بودن خطا نیست (Buchan, 1993 و McKee and

مدل‌های کمپل و روسو عملکرد مناسبی در تخمین منحنی مشخصه خاک داشتند. (Groenevelt and Grant (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. در بسیاری از مطالعات برای پیش‌بینی منحنی مشخصه نگهداری آب در خاک از مدل ونگوختن استفاده می‌شود بدون آنکه کارایی آن نسبت به دیگر مدل‌ها مقایسه شود. (Bayat et al (2013 تعداد ۷۵ نمونه بافت مختلف را مورد بررسی قرار دادند، آنها مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب و خاک را به داده‌های برداشت شده برازش دادند و به این نتیجه رسیدند که در بین مدل‌ها مدل بروکس-کوری، کازوگی و گاردنر کمترین و مدل ون گنوختن بیشترین دقت را داشتند. 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. (Abyaneh et al (2018 منحنی رطوبتی ون گنوختن با روش حل معکوس، دو نقطه‌ای و مدل‌های پنجگانه برنامه رزتا تعیین و پس از ارزیابی، منحنی‌های رطوبتی برآوردی آن‌ها مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفت. نتایج ضرایب هیدرولیکی روش‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با روش معکوس نشان از برتری روش دو نقطه‌ای داشت. در بین مدل‌های رزتا مدل ۴ بیشترین دقت و مدل ۵ به دلیل بیش برآوردی زیاد ضریب n ، کمترین دقت در تخمین ضرایب را داشت. (Bagheri and Shahidi (2021 به ارزیابی روش‌های مختلف شبیه سازی منحنی رطوبتی خاک پرداختند. نتایج نشان داد که مدل ون گنوختن و کاسوگی شباهت نسبی به یکدیگر داشته و S شکل بوده، در حالی که مدل بروکس-کوری در مکش‌های نزدیک به صفر دارای شکست بوده و دقت مناسبی در این محدوده نداشت که با توزیع حفرات خاک هم خوانی ندارد.

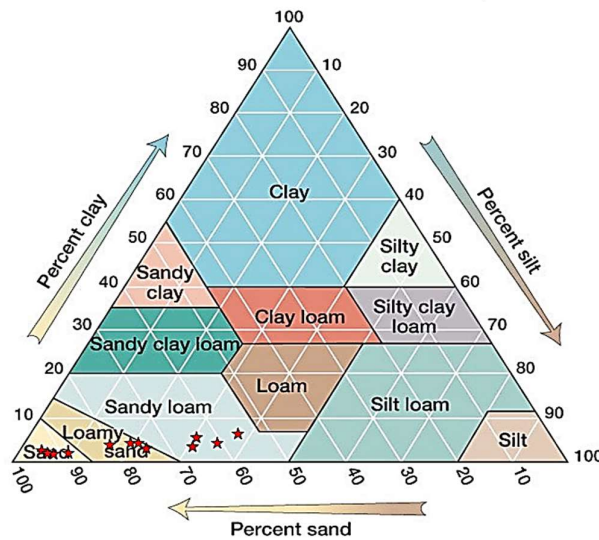
منحنی رطوبتی رابطه میزان رطوبت خاک را با مکش ماتریک خاک نشان می‌دهد و یک خصوصیت پایه‌ای برای مطالعه آب قابل دسترس برای گیاه، پدیده‌های نفوذ، زهکشی، هدایت هیدرولیکی، تعیین زمان و مقدار آبیاری، تنش آبی گیاهان و حرکت مواد محلول در خاک است.

θ_{fit} و θ_{means} به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری و تخمین زده شده در مکش یکسان و n تعداد نقاط اندازه‌گیری هستند. برای گروه‌بندی مدل‌ها از نظر آماره‌های R^2 و RMSE مقایسه میانگین بین مدل‌ها با آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. لازم به ذکر است برای برازش مدل‌ها از Solver در نرم‌افزار Excel استفاده شد گردیده است.

Bumb, 1984. به همین دلیل 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 آن‌ها این آماره نیز محاسبه گردید. برای محاسبه خطا از روابط زیر استفاده شد:

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

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



شکل ۱- توزیع کلاس بافتی نمونه خاک های مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی نمونه خاک‌های استفاده شده

بافت خاک	تعداد نمونه‌ها	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	چگالی ظاهری	تخلخل (%)
شنی	۴	۲-۳/۵	۶-۱۱/۸	۸۹-۹۴	۱/۳۷-۱/۶۳	۰/۳۸-۰/۴۸
لوم شنی	۴	۴-۵/۵	۱۵/۲-۱۸	۷۵-۸۳	۱/۰۶-۱/۴۸	۰/۵۸-۰/۶
شنی لوم	۴	۵/۵-۷/۴	۲۶-۳۷	۵۸-۶۷/۸	۱/۱۴-۱/۶۵	۰/۶-۱/۳۲
سیلتی لوم	۴	۳۲/۲-۳۸/۱	۵۱/۵-۶۳/۲	۴/۶-۱۰/۴	۱/۱۲-۱/۶۶	۰/۳۶-۰/۵۸

جدول ۲- مدل‌های مختلف استفاده شده در این پژوهش

پارامترها	معادله	مدل
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + a\psi^n} \right)$	گاردنر (۱۹۵۶)
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{a} \right)^{-n}$	بروکس-کوری (۱۹۶۴)
$\theta_r, \theta_s, a, n, m$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right)^m$	ون گنوختن (۱۹۸۰)
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n} \right)$	تانی (۱۹۸۲)
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp \left(\frac{a - \psi}{n} \right)$	بولتزمن (۱۹۸۴)

θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1/(1 + \exp(\frac{a - \psi}{n})))$	فرمی (۱۹۸۷)
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1/(1 + (a\psi)^n)^{1-\frac{1}{n}})$	ون گنوختن - معلم
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\frac{1}{1 + (\frac{\psi}{a})^n})$	برتسارت (۱۹۶۶)
θ_r, θ_s, a, n	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1/(1 + (a\psi)^n)^{1-\frac{2}{n}})$	بردین (۱۹۵۳)

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 نیست (Gimenez, 2010).

لازم به ذکر است اعداد داخل پرانتز در جداول نشان دهنده انحراف معیار آماره‌ها می‌باشند. انحراف معیار هر آماره، پراکندگی آن را اطراف میانگین نشان می‌دهد. در این مطالعه مدل‌های ون گنوختن، ون گنوختن معلم، براتسارت از نظر انحراف معیار کمترین مقدار و مدل‌های بروکس - کوری و فرمی بیشترین مقدار را دارند.

مقایسه میانگین آماره‌های مدل‌ها در برازش منحنی مشخصه آب خاک برای بافت شنی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که گفته شد رتبه‌بندی مدل‌ها در جداول براساس RMSE است. مدل‌های ون گنوختن معلم، براتسارت و گاردنر در بیشترین سطح دقت از نظر R^2 و RMSE قرار دارند و نتایج حاصل از مقایسه میانگین نیز بین این مدل‌ها تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان نداده است. همچنین در این بافت تفاوت معنی‌داری بین مدل تانی و ون گنوختن وجود نداشته است. بین مدل فرمی و بوردن نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید. در این بافت کمترین همبستگی در مدل بروکس-کوری مشاهده گردید. در این مطالعه مدل‌های ون گنوختن و ون گنوختن معلم از نظر انحراف معیار کمترین مقدار و مدل‌های بوردن و فرمی بیشترین مقدار را دارند. (Patil et al (2012) با مطالعه خاک‌های ورتیسول هند نشان دادند که مدل ونگنوختن نسبت به مدل بروکس-کوری برتری دارد. نتایج به‌دست آمده از پژوهش پتیل و همکاران با نتایج حاصل از این پژوهش تطابق دارد. (Bayat et al (2013) با بررسی کل نمونه‌های خاک در پژوهش خود عنوان کردند که مدل‌های بروکس-کوری و گاردنر در غالب حالت‌های مورد مطالعه

در تمامی مدل‌ها θ ، رطوبت حجمی خاک، θ_s رطوبت اشباع در مکش صفر، θ_r رطوبت باقیمانده در مکش ۱۵۰۰ 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 ونگنوختن، 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 n مکش در نقطه عطف منحنی است. در مدل فرمی پارامتر a برابر با مکش خاک در حالتی که درجه اشباع موثر برابر با ۰/۵ باشد.

نتایج و بحث

مقایسه میانگین آماره‌های مدل‌ها در برازش منحنی مشخصه آب خاک برای کل نمونه‌های خاک در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که بیان شد رتبه‌بندی مدل‌ها در جداول براساس RMSE است. مدل‌های ون گنوختن، ون گنوختن معلم، براتسارت و گاردنر در بیشترین سطح دقت از نظر R^2 و RMSE قرار دارند و نتایج حاصل از مقایسه میانگین نیز بین این مدل‌ها تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد ($P < 0/05$) نشان نداده است. مدل‌های بروکس - کوری، تانی و فرمی در بین مدل‌های استفاده شده دقت ضعیفی در برازش بر داده‌های تجربی از خود نشان دادند. همچنین مدل‌های بروکس-کوری و فرمی از نظر R^2 تفاوت معنی‌داری با سایر مدل‌ها دارند.

دقت کم مدل بروکس و کوری در برازش را می‌توان به این صورت بیان کرد که هر اندازه منافذ یکنواخت‌تر باشند مقدار پارامتر n بزرگتر بیشتر خواهد شد. مدل بروکس-

کوری نتایج دقیق‌تری را نشان داد که با مطالعه حاضر مطابقت نشان می‌دهد. در مطالعه Fouladmand and Hadipour (2011) مدل ون گنوختن برای خاک‌های مورد بررسی مناسب‌تر از مدل بروکس- کوری می‌باشد که با نتیجه مطالعات حاضر مطابقت دارد.

دقت پایینی داشتند و غالباً تفاوت آن‌ها با سایر مدل‌ها معنی‌دار بود. این سه مدل دارای بیشترین پراکندگی در R^2 و RMSE می‌باشند. در مطالعه حاضر مدل بروکس- کوری از دقت کمی برخوردار بود. همچنین (Bayat et al (2013) عنوان کردند مدل ون گنوختن نسبت به مدل بروکس-

جدول ۳- دقت برازش مدل‌ها برای پیش‌بینی SWCC برای کل نمونه‌های خاک

مدل	RMSE	ME	R^2
ون گنوختن	۰/۰۱۱(۰/۰۰۷) ^f	-۰/۰۰۰۶(۰/۰۰۲) ^{ab}	۰/۹۹۲(۰/۰۱۱) ^a
ون گنوختن- معلم	۰/۰۱۵(۰/۰۰۸) ^a	-۰/۰۰۲۷(۰/۰۰۵) ^a	۰/۹۹۰(۰/۰۰۷) ^a
برائسارت	۰/۰۱۶(۰/۰۰۱) ^a	۰/۰۰۱۱(۰/۰۰۶) ^{bd}	۰/۹۸۹(۰/۰۰۹) ^a
گاردنر	۰/۰۱۷(۰/۰۱۱) ^a	۰/۰۰۱۵(۰/۰۰۵) ^b	۰/۹۸۶(۰/۰۱۵) ^a
بوردن	۰/۰۱۹(۰/۰۱۳) ^{ad}	-۰/۰۰۶۶(۰/۰۰۹) ^{ac}	۰/۹۸۴(۰/۰۱۷) ^{acd}
بولتزمن	۰/۰۲۶(۰/۰۱۴) ^d	۰/۰۰۳۷(۰/۰۰۴) ^f	۰/۹۷۱(۰/۰۲۶) ^{cd}
تانی	۰/۰۳۷(۰/۰۱۷) ^c	۰/۰۰۱۴(۰/۰۰۵) ^{bef}	۰/۹۵۷(۰/۰۲۶) ^c
فرمی	۰/۰۵۵(۰/۰۲۱) ^{be}	۰/۰۰۸۰(۰/۰۲۹) ^{abf}	۰/۹۲۲(۰/۰۵۶) ^c
بروکس و کوری	۰/۰۶۱(۰/۰۱۷) ^b	-۰/۰۰۷۵(۰/۰۰۱) ^c	۰/۸۳۶(۰/۰۷۲) ^b

ندارند. همچنین مدل‌های گاردنر، بولتزمن، فرمی، بوردن و ون گنوختن نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشند. در این بافت کمترین همبستگی در مدل بروکس - کوری مشاهده گردید. در این مطالعه مدل‌های ون گنوختن و بوردن از نظر انحراف معیار کمترین مقدار و مدل‌های بروکس- کوری و فرمی بیشترین مقدار را دارند.

مقایسه میانگین آماره‌های مدل‌ها در برازش منحنی مشخصه آب خاک برای بافت لوم شنی در جدول ۴ نشان داده شده است. مدل‌های ون گنوختن، ون گنوختن معلم، برائسارت، گاردنر و بوردن در بیشترین سطح دقت از نظر R^2 و RMSE قرار دارند. نتایج نشان داد مدل‌های ون گنوختن معلم، گاردنر، بولتزمن، برائسارت و ون گنوختن از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار ندارند. بین مدل‌های بروکس- کوری و تانی تفاوت معنی‌داری وجود دارد. همچنین بین این مدل‌ها با سایر مدل‌های به‌کار رفته نیز تفاوت معنی‌داری وجود دارد. در این بافت کمترین دقت در مدل بروکس - کوری مشاهده گردید. در این مطالعه مدل‌های ون گنوختن و بوردن از نظر انحراف معیار کمترین مقدار و مدل‌های بروکس- کوری و فرمی بیشترین مقدار را

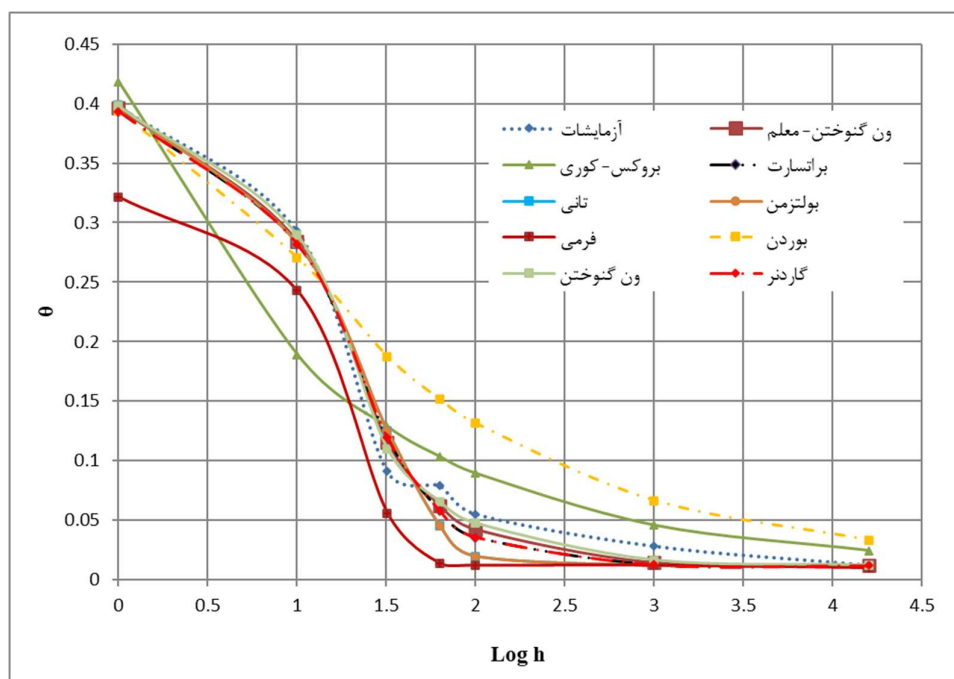
مقایسه میانگین آماره‌های مدل‌ها در برازش منحنی مشخصه آب خاک برای بافت شن لومی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که گفته شد رتبه‌بندی مدل‌ها در جداول براساس RMSE است. مدل‌های ون گنوختن، ون گنوختن معلم، برائسارت، گاردنر و بوردن در بیشترین سطح دقت از نظر R^2 و RMSE قرار دارند و نتایج حاصل از مقایسه میانگین نیز بین این مدل‌ها تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد ($P < 0/05$) نشان نداده است. در این بافت کمترین همبستگی در مدل بروکس- کوری مشاهده گردید. در این مطالعه مدل‌های ون گنوختن، ون گنوختن معلم و بوردن از نظر انحراف معیار کمترین مقدار و مدل‌های تانی و فرمی بیشترین مقدار را دارند. مقایسه میانگین آماره‌های مدل‌ها در برازش منحنی مشخصه آب خاک برای بافت لومی سیلت در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که بیان شد رتبه‌بندی مدل‌ها در جداول براساس RMSE است. مدل‌های ون گنوختن، ون گنوختن معلم، برائسارت، گاردنر و بوردن در بیشترین سطح دقت از نظر R^2 و RMSE قرار دارند. نتایج نشان داد مدل‌های ون گنوختن معلم و برائسارت از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار

همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل ونگنوختن، ون گنوختن معلم، براتسارت و گاردنر بیشترین مطابقت را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نتایج آماری را تایید می‌نماید.

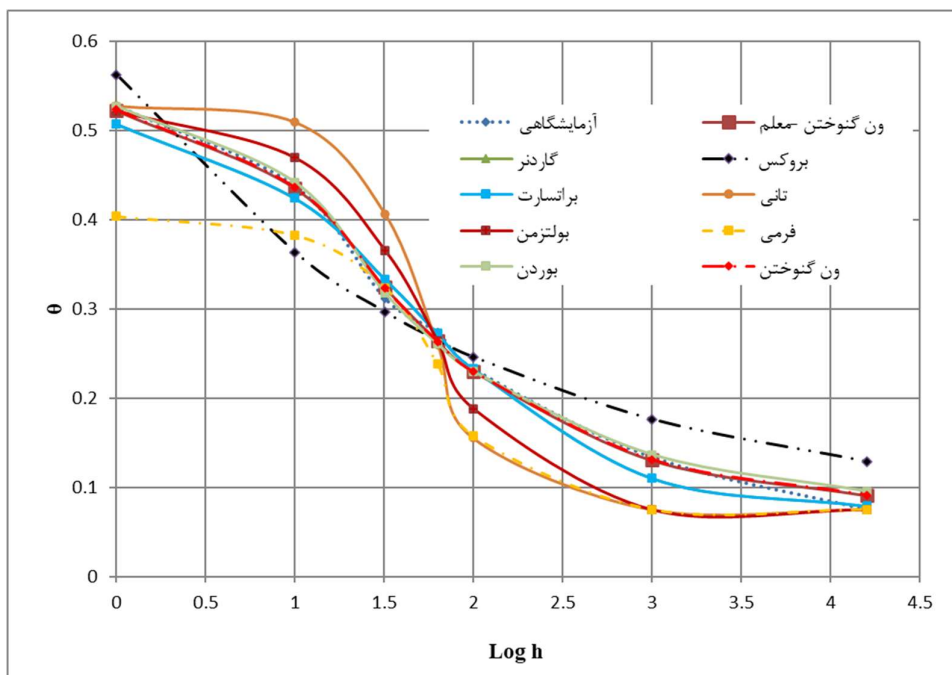
به عنوان نمونه شکل ۶ رابطه بین مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و برازش شده توسط مدل ون گنوختن برای دو مکش ۱ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. همچنین با خط یک به یک مقایسه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید مدل ونگنوختن در رطوبت‌های زیاد، دقت بیشتری نسبت به رطوبت کم دارد. Ross et al (1991) و Bayat et al (2013) نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند.

دارند. نتایج به‌دست آمده بیانگر این است که چنانچه کل نمونه‌های خاک در نظر گرفته شود، مدل‌های ون گنوختن-معلم، ون گنوختن، گاردنر و براتسارت برای برازش منحنی مشخصه آب و خاک بیشترین و مدل بروکس و کوری کمترین دقت را دارا می‌باشند. همچنین چنانچه نتایج مربوط به هر بافت خاک جداگانه مورد بررسی قرار گیرند، مدل‌های ون گنوختن-معلم، ون گنوختن، گاردنر و براتسارت به ترتیب بهترین دقت را دارا می‌باشند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این منطقه مدل‌های اخیر برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی پیشنهاد می‌گردد.

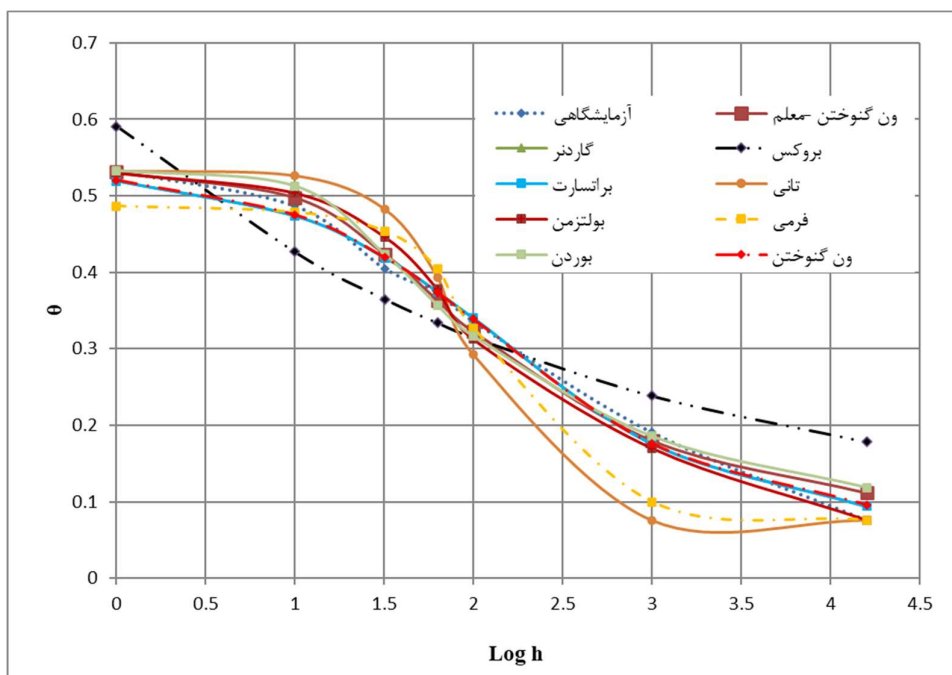
همچنین در شکل ۲ تا ۵ مقایسه منحنی مشخصه داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های مختلف را برای بافت‌های شنی، شنی لومی، لوم سیلتی و لوم شنی مشاهده می‌کنید.



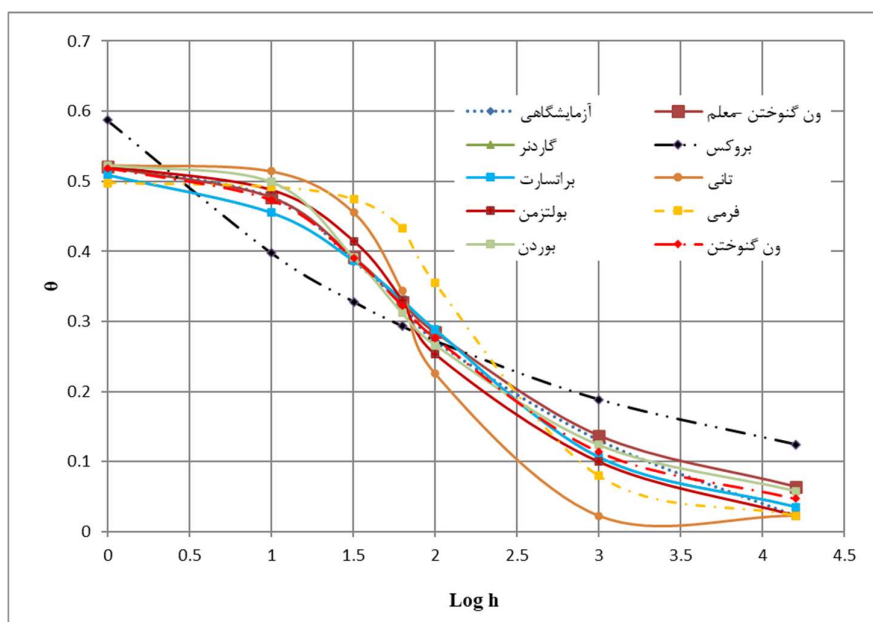
شکل ۲- مقایسه منحنی مشخصه داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های مختلف را برای بافت‌های شنی



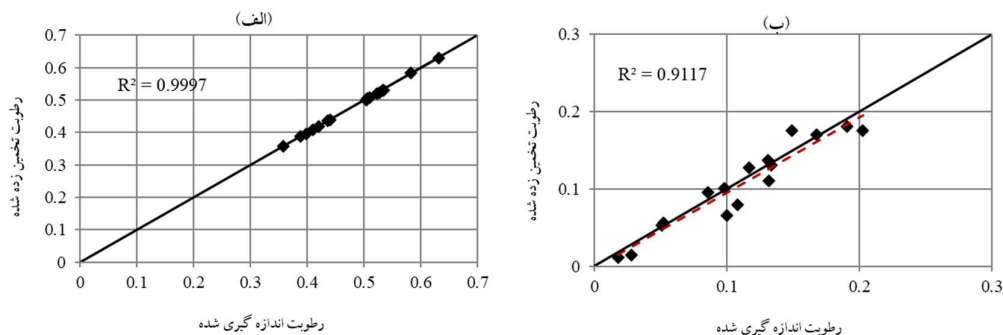
شکل ۳- مقایسه منحنی مشخصه داده های آزمایشگاهی و مدل های مختلف را برای بافت های شن لومی



شکل ۴- مقایسه منحنی مشخصه داده های آزمایشگاهی و مدل های مختلف را برای بافت های لوم سیلتی



شکل ۵- مقایسه منحنی مشخصه داده های آزمایشگاهی و مدل های مختلف را برای بافت های لوم شنی



شکل ۶- دقت برازش نقاط رطوبتی اندازه گیری شده و تخمینی در مدل ون گنوختن (الف) مکش ۱ کیلو پاسکال (ب) مکش ۱۰۰۰ کیلو پاسکال

جدول ۴- دقت برازش مدل ها برای پیش بینی SWCC در کلاس های بافت خاک شنی و شن لومی

مدل	شنی			شن لومی		
	ME	RMSE	R ²	ME	RMSE	R ²
ون گنوختن	-۰/۰۰۰۲(۰/۰۰۱) ^a	۰/۰۰۸(۰/۰۰۲) ^{ac}	۰/۹۹۶(۰/۰۰۷) ^a	۰/۰۰۰۹(۰/۰۰۱) ^a	۰/۰۰۹(۰/۰۰۱) ^a	۰/۹۹۶(۰/۰۰۷) ^a
ون گنوختن- معلم	-۰/۰۰۰۹(۰/۰۰۲) ^a	۰/۰۱۲(۰/۰۰۶) ^a	۰/۹۹۳(۰/۰۰۳) ^a	-۰/۰۰۰۹(۰/۰۰۲) ^a	۰/۰۱۲(۰/۰۰۳) ^a	۰/۹۹۳(۰/۰۰۳) ^a
گاردنر	۰/۰۰۴(۰/۰۰۳) ^b	۰/۰۱۶(۰/۰۱۱) ^a	۰/۹۸۹(۰/۰۰۸) ^a	۰/۰۰۴(۰/۰۰۳) ^a	۰/۰۱۵(۰/۰۰۸) ^a	۰/۹۸۹(۰/۰۰۸) ^a
براتسارت	۰/۰۰۴(۰/۰۰۳) ^{bd}	۰/۰۱۶(۰/۰۱۱) ^a	۰/۹۸۹(۰/۰۰۸) ^a	۰/۰۰۴(۰/۰۰۳) ^a	۰/۰۱۵(۰/۰۰۸) ^a	۰/۹۸۹(۰/۰۰۸) ^a
بوردن	-۰/۰۰۲(۰/۰۰۱) ^a	۰/۰۲۲(۰/۰۲۳) ^{abc}	۰/۹۹۲(۰/۰۰۳) ^a	-۰/۰۰۲(۰/۰۰۱) ^{ab}	۰/۰۲۲(۰/۰۲۳) ^{abc}	۰/۹۷۸(۰/۰۳۳) ^{abc}
بولتزمن	۰/۰۰۶(۰/۰۰۵) ^{bf}	۰/۰۲۴(۰/۰۱۲) ^c	۰/۹۷۱(۰/۰۱۶) ^{ab}	۰/۰۰۶(۰/۰۰۵) ^a	۰/۰۲۴(۰/۰۱۲) ^c	۰/۹۷۶(۰/۰۱۶) ^c
تانی	۰/۰۰۰(۰/۰۰۴) ^{ac}	۰/۰۲۶(۰/۰۲۲) ^{abc}	۰/۹۴۴(۰/۰۳۱) ^{ab}	-۰/۰۰۰۳(۰/۰۰۴) ^a	۰/۰۲۶(۰/۰۲۲) ^{abc}	۰/۹۷۴(۰/۰۳۲) ^{ac}
بروکس و کوری	-۰/۰۰۷(۰/۰۰۰) ^c	۰/۰۵۶(۰/۰۱۲) ^b	۰/۸۸۷(۰/۰۴۴) ^b	-۰/۰۰۷(۰/۰۰۰) ^b	۰/۰۵۶(۰/۰۱۲) ^b	۰/۸۵۴(۰/۰۶۱) ^b
فرمی	۰/۰۰۸(۰/۰۳۲) ^{abc}	۰/۰۶۷(۰/۰۳۰) ^{bd}	۰/۹۷۱(۰/۰۴۴) ^{bc}	۰/۰۰۸(۰/۰۳۲) ^{ab}	۰/۰۶۷(۰/۰۳۰) ^{bd}	۰/۹۲۱(۰/۰۹۱) ^{abc}

جدول ۵- دقت برازش مدل‌ها برای پیش‌بینی SWCC در کلاس‌های بافت خاک لوم سیلت و لوم شنی

مدل	لومی سیلت			لوم شنی		
	ME	RMSE	R ²	ME	RMSE	R ²
ون گنوختن	۰/۰۱۹(۰/۰۱۲) ^a	۰/۹۸۰(۰/۰۱۹) ^{ac}	۰/۰۰۹(۰/۰۰۱) ^{bd}	۰/۰۰۷(۰/۰۰۲) ^a	۰/۹۹۷(۰/۰۰۱) ^{af}	۰/۰۰۰(۰/۰۰۰) ^{ab}
براتسارت	۰/۰۲۱(۰/۰۱۳) ^a	۰/۹۸۶(۰/۰۱۰) ^a	۰/۰۱۵(۰/۰۰۸) ^{ab}	۰/۰۱۰(۰/۰۰۴) ^a	۰/۹۹۵(۰/۰۰۲) ^{ac}	۰/۰۰۱(۰/۰۰۲) ^a
ون گنوختن- معلم	۰/۰۲۴(۰/۰۱۱) ^a	۰/۹۸۲(۰/۰۰۷) ^a	۰/۰۱۲(۰/۰۰۳) ^a	۰/۰۱۲(۰/۰۰۴) ^a	۰/۹۹۴(۰/۰۰۳) ^a	۰/۰۰۴(۰/۰۰۳) ^a
گاردنر	۰/۰۲۵(۰/۰۱۷) ^a	۰/۹۷۲(۰/۰۲۴) ^{ac}	۰/۰۱۵(۰/۰۰۸) ^b	۰/۰۱۰(۰/۰۰۴) ^a	۰/۹۹۵(۰/۰۰۲) ^{ac}	۰/۰۰۱(۰/۰۰۲) ^a
بوردن	۰/۰۲۷(۰/۰۰۹) ^{ac}	۰/۹۷۸(۰/۰۰۶) ^{ac}	۰/۰۰۲(۰/۰۰۲) ^a	۰/۰۱۴(۰/۰۰۴) ^{ac}	۰/۹۸۹(۰/۰۰۶) ^{cef}	۰/۰۰۵(۰/۰۰۱) ^a
بولتزمن	۰/۰۳۶(۰/۰۱۸) ^{ac}	۰/۹۴۷(۰/۰۴۲) ^{ac}	۰/۰۳۰(۰/۰۱۵) ^{ab}	۰/۰۱۵(۰/۰۰۳) ^a	۰/۹۹۱(۰/۰۰۳) ^{ac}	۰/۰۰۱(۰/۰۰۲) ^b
تانی	۰/۰۴۲(۰/۰۱۲) ^{ab}	۰/۹۴۷(۰/۰۱۹) ^c	۰/۰۴۵(۰/۰۲۰) ^{bc}	۰/۰۳۵(۰/۰۱۴) ^c	۰/۹۶۴(۰/۰۱۶) ^c	۰/۰۰۱(۰/۰۰۴) ^a
فرمی	۰/۰۵۲(۰/۰۱۴) ^{bc}	۰/۹۱۳(۰/۰۶۷) ^{ac}	۰/۰۵۶(۰/۰۲۱) ^{ab}	۰/۰۴۳(۰/۰۱۶) ^{bd}	۰/۹۳۷(۰/۰۲۹) ^{bd}	۰/۰۰۱(۰/۰۲۴) ^{ab}
بروکس و کوری	۰/۰۷۹(۰/۰۲۴) ^b	۰/۸۵۷(۰/۰۸۲) ^b	۰/۰۵۰(۰/۰۱۱) ^{ab}	۰/۰۵۹(۰/۰۰۵) ^b	۰/۸۴۴(۰/۰۳۷) ^b	۰/۰۰۷(۰/۰۰۰) ^a

نتیجه‌گیری

مدل‌های بسیاری برای توصیف منحنی مشخصه آب خاک و برازش بر داده‌های تجربی ارائه شده است اما به ندرت توانایی آن‌ها در تخمین منحنی مذکور برای خاک‌های مختلف بررسی شده است. در این پژوهش از اطلاعات مکش- رطوبت شانزده نمونه خاک استفاده شد. تعداد ۹ مدل معروف و پرکاربرد منحنی مشخصه آب خاک بر داده‌های تجربی برازش داده شد. دقیق‌ترین مدل بر اساس معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین و میانگین خطا انتخاب شدند. بیشتر مدل‌های استفاده شده در این تحقیق دارای دقت مناسبی برای پیش‌بینی منحنی مشخصه نگهداری آب خاک بودند. مدل‌های ون گنوختن،

ون گنوختن معلم، براتسارت و گاردنر بیشترین دقت را داشتند و نتایج مقایسه میانگین نشان داد که غالباً تفاوت معنی‌داری بین این مدل‌ها وجود ندارد. همچنین مدل‌های بروکس- کوری و فرمی در غالب حالت‌های مورد مطالعه دقت کمی داشتند و غالباً تفاوت آنها با سایر مدل‌ها معنی‌دار بود. این دو مدل دارای بیشترین پراکندگی در R² و RMSE هستند. مدل‌های تانی، بولتزمن و بوردن نتایجی در سطح متوسط از دقت نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه کرد. همچنین مدل ونگنوختن نسبت به مدل‌های دیگر نتایج دقیق‌تری را نشان داد. ضمن آن که مدل ونگنوختن در رطوبت‌های زیاد دقت تخمین بیشتری نسبت به رطوبت‌های کم دارد.

منابع

Bagheri H., Shahidi A. 2021. Evaluation of different methods of simulating the soil moisture curve. The 5th National Congress of Irrigation and Drainage of Iran. Birjand, Iran. (In Persian)

Bayat H., Ebrahimi E., Rastgo M., Zare Abyaneh H., Davatgar N. 2013. Fitting different soil water characteristic Curve models on the experimental data of various textural classes of Guilan Province Soils. *Water and Soil Science*, 23(3), pp. 151-167. (In Persian)

Bayram M., Heidari F., Saghaei S. 2016. Assessing the soil water characteristic curve (SWCC) models. *Journal of Environment and*

Water Engineering. 1(1), pp. 30-50. (In Persian)

Buchan GD., Grewal KS., Robson AB. 1993. Improved models of particle-size distribution: An illustration of model comparison techniques. *Soil Science Society of America Journal*. 57(4), pp. 901-908.

Brooks R., A. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins, CO.

Campbell GS. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*. 117(6), pp. 311-314.

- Durner W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resource Research*. 30(2), pp. 211–223.
- Fooladmand H.R., Hadipour S. 2012. Evaluation of parametric pedotransfer functions for estimating soil water characteristic curve in Fars Province. *Journal of Water and Soil Science*, 15 (58), pp.25-37. (In Persian)
- Gardner W. 1956. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. International Symposium on Physico Chemical Phenomenon in Soils. Washington DC.
- Groenevelt PH., 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(3), pp. 479-485.
- Gimenz D., Rawls WJ., Pachepsky Y., Watt JPC. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil Science*. 166(2), pp. 79-88.
- Gupta S.C., Larson W.E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resource Research*. 15(6), pp. 1633-1635.
- Haghshenas M., Beigi Harcheghani H. 2010. The effect of Mianeh zeolite on water retention and water retention models in two soil textures. *Iranian Water Research Journal*, 4(1), pp. 35-42. (In Persian)
- Hodentt MG., Tomasella J. 2002. Water retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*. 108(3-4), pp. 155-180.
- Jauhainen M. 2004. Relationships of particle size distribution curve, Soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity and their implications on water balance of forested and agricultural hillslopes, Ph.D Thesis, Helsinki University of Technology, Helsinki/Finland.
- Kozak E. Pachepsky Y. A., Sokolowski S., Sokolowska Z., Stepniewski W. 1996. A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science Society of America Journal*. 60(5), pp. 1291–1297.
- McKee C., Bumb A. 1984. The importance of unsaturated low parameters in designing a hazardous waste site. 50-58.
- McKee C., Bumb A. 1987. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. *SPE Formation Evaluation*. 2(04), pp. 599-608.
- Patil NG., Pal DK., Mandal C., Mandal DK. 2012. Soil water retention characteristics of vertosols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural network approach to estimate AWC. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(2), pp.1-10.
- Ross PJ., Williams J., Bristow KL. 1991. Equations for extending water retention curves to dryness. *Soil Science Society of America Journal*. 55(4), pp. 923-927.
- Sillers WS., Fredlund DG., 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. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 4(1), pp. 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(11), pp. 409-418.
- van Genuchten MTh. 1980. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44(5), pp. 892-898.
- Vereecken H., Maes J., Feyen J., Darius P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture bulk density and carbon content. *Soil Science*. 148(6), pp. 389-403.
- Zare Abyaneh H., Mahdavi Moghadam N., Bagheri H. 2018. Soil moisture estimation by determining of van Genuchten retention-curve coefficients in drip irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 6(11), p. 1121-1129. (In Persian)