

ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در استان فارس

حمیدرضا فولادمند* و سحر هادی پور^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۳۰)

چکیده

منحنی مشخصه آب خاک نشان‌دهنده تغییرات رطوبت در برابر مکش آب خاک است که در مسائل حرکت آب در خاک دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. اندازه‌گیری این منحنی در آزمایشگاه وقت‌گیر و پرهزینه است، بنابراین روش‌های بسیاری برای تخمین آن ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به توابع انتقالی اشاره نمود. با استفاده از توابع انتقالی امکان تخمین منحنی مشخصه از روی سایر پارامترهای خاک که اندازه‌گیری آنها آسان‌تر است، امکان‌پذیر می‌شود. توابع انتقالی پارامتریک توابعی هستند که برای پارامترهای مدل‌های موجود منحنی مشخصه ارائه شده‌اند. در این پژوهش ۱۲ تابع انتقالی پارامتریک داخلی و خارجی برای مدل‌های بروکس و کوری، کمپیل و ونگنوختن در نظر گرفته شدند و روی ۳۰ نمونه خاک با بافت‌های مختلف در استان فارس مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این منظور منحنی مشخصه آب خاک و سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی لازم خاک‌ها اندازه‌گیری شدند و خاک‌ها با توجه به بافت به سه گروه ریز، میانه و درشت بافت تقسیم شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که توابع پارامتریک مدل ونگنوختن مناسب‌تر از توابع انتقالی پارامتریک دو مدل دیگر می‌باشد که از دلایل آن برازش بهتر مدل ونگنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری شده است. همچنین نتایج نشان داد که تابع پارامتریک وستن و همکاران مناسب‌ترین تابع برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در خاک‌های مورد بررسی در استان فارس است و توابع داخلی ارائه شده چندان مناسب نیستند.

واژه‌های کلیدی: منحنی مشخصه آب خاک، توابع انتقالی پارامتریک، مدل بروکس و کوری، مدل کمپیل، مدل ونگنوختن

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی‌ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrfoolad@yahoo.com

مقدمه

برای تکمیل منحنی مشخصه نیاز به روابط زیادی می‌باشد. در این زمینه در ایران پژوهش‌هایی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های خداوردیلو و همایی (۲)، فرخیان فیروزی و همایی (۷)، فولادمند (۹ و ۲۱)، قربانی دشتکی و همایی (۱۳) و گیوی و همکاران (۲۳) اشاره نمود.

۳. توابع انتقالی پارامتریک که ارائه‌دهنده روابطی برای تخمین پارامترهای یک مدل شناخته شده منحنی مشخصه هستند. معروف‌ترین مدل‌های منحنی مشخصه مدل‌های بروکس و کوری (۱۹)، کمپیل (۲۰) و ونگنوختن (۳۰) می‌باشند که آخری از همه متداول‌تر است. در این زمینه پژوهش‌های بسیار زیادی در ایران و سایر نقاط دنیا انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های ترابی فارسانی و قهرمان (۱)، قربانی دشتکی و همایی (۱۲)، مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵)، میرخانی و همکاران (۱۶)، قنبریان علویجه و لیاقت (۲۲)، راولز و براکنسیک (۲۴)، راولز و همکاران (۲۵)، سپاسخواه و بندار (۲۶)، وریکن و همکاران (۳۱)، وستن (۳۳) و وستن و همکاران (۳۴) اشاره نمود.

هدف اصلی از این پژوهش مقایسه و ارزیابی تعدادی از توابع انتقالی پارامتریک داخلی و خارجی موجود برای ۳۰ نمونه خاک با بافت‌های مختلف در استان فارس است تا بتوان تابع پارامتریک مناسب را برای بافت‌های مورد بررسی تعیین نمود.

مواد و روش‌ها

شکل نهایی مدل‌های بروکس و کوری (۱۹)، کمپیل (۲۰) و ونگنوختن (۳۰) به ترتیب به صورت معادله‌های زیر هستند:

$$\frac{\theta - \theta_{rBC}}{\theta_s - \theta_{rBC}} = \left(\frac{h}{h_{bBC}}\right)^{-\lambda BC} \quad [1]$$

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h}{h_{bC}}\right)^{-\lambda C} \quad [2]$$

$$\frac{\theta - \theta_{rv}}{\theta_s - \theta_{rv}} = \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m} \quad [3]$$

در معادله‌های فوق θ مقدار رطوبت حجمی خاک برحسب متر مکعب بر مترمکعب در مکش h برحسب سانتی‌متر، θ_s رطوبت

منحنی مشخصه آب خاک که بیان‌گر تغییرات رطوبت در برابر مکش آب خاک است، در مسائل مربوط به حرکت آب در خاک غیراشباع کاربرد فراوان دارد و شناسایی رفتار فیزیکی خاک در رطوبت‌های مختلف را آسان‌تر می‌کند. اندازه‌گیری این منحنی در آزمایشگاه وقت‌گیر و پرهزینه است، از این رو به وسیله پژوهشگران زیادی در سطح دنیا تلاش‌های فراوانی برای تخمین آن به جای اندازه‌گیری مستقیم ارائه شده است. یکی از متداول‌ترین روش‌های موجود در این زمینه استفاده از توابع انتقالی خاک (Pedotransfer functions) است. با استفاده از توابع انتقالی منحنی مشخصه آب خاک به وسیله پارامترهای زودیافت خاک که اندازه‌گیری آنها ساده‌تر و متداول‌تر است، قابل تخمین است. از جمله پارامترهای زودیافت خاک می‌توان به مقادیر رس، سیلت و شن خاک، چگالی ظاهری و ماده آلی خاک اشاره نمود.

توابع انتقالی منحنی مشخصه را می‌توان به سه دسته کلی زیر تقسیم نمود:

۱. توابع انتقالی فیزیکی - تجربی که بر مبنای سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد. از این دسته توابع می‌توان به تخمین منحنی مشخصه با استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک اشاره نمود که به وسیله آریا و پاریس (۱۷) ارائه شد و سپس به وسیله آریا و همکاران (۱۸) توسعه یافت. در این زمینه در ایران نیز پژوهش‌هایی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های خوشنودیزدی و قهرمان (۳)، رخشنده‌رو و اسلامی حقیقت (۴)، رضایی و نیشابوری (۵)، رضایی و همکاران (۶)، فولادمند (۸ و ۱۰)، فولادمند و همکاران (۱۱)، قنبریان علویجه و همکاران (۱۴) و سپاسخواه و رفیعی (۲۷) اشاره نمود.

۲. توابع انتقالی نقطه‌ای که امکان تخمین رطوبت خاک را در مکش‌های معینی فراهم می‌سازند. مهم‌ترین مکش‌های مورد نظر نیز مربوط به رطوبت خاک در دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم هستند. بزرگ‌ترین مشکل این توابع آن است که

توجه به درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک با استفاده از روابط ارائه شده به وسیله شیرازی و بورسما (۲۸) قابل محاسبه می‌باشند.

PTF7: توابع سپاسخواه و بندار (۲۴) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری، درصد ماده آلی، درصد‌های رس، سیلت و شن استفاده شده است. هم‌چنین در این تابع مقدار رطوبت در نقطه عطف منحنی مشخصه آب خاک از دیگر پارامترهای مدل است که از میانگین رطوبت‌های ته‌مانده و اشباع خاک محاسبه می‌شود. برای این منظور رطوبت حجمی اشباع به کمک چگالی ظاهری و رطوبت ته‌مانده نیز به کمک چگالی ظاهری، درصد ماده آلی و درصد‌های رس و سیلت خاک محاسبه می‌شوند.

PTF8: توابع اصلاح شده قربانی دشتکی و همایی (۱۲) به وسیله مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری، درصد ماده آلی، درصد‌های رس، سیلت و شن، اسیدیته (pH) خاک، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک استفاده شده است.

PTF9: توابع اصلاح شده سپاسخواه و بندار (۲۶) به وسیله مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای درصد ماده آلی، درصد‌های رس و شن، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک و رطوبت ته‌مانده خاک استفاده شده است.

PTF10: توابع شیرازی و بورسما (۲۸) برای مدل کمپیل (۲۰): در این توابع از متغیرهای میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک استفاده شده است.

PTF11: توابع قنبریان علویجه و لیاقت (۲۲) برای مدل کمپیل (۲۰): در این توابع از متغیرهای میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک استفاده شده است.

PTF12: توابع راولز و همکاران (۲۵) برای مدل بروکس و کوری (۱۹): در این توابع از متغیرهای رطوبت حجمی اشباع و

حجمی اشباع خاک برحسب مترمکعب بر مترمکعب، θ_{tBC} و θ_{tV} به ترتیب رطوبت حجمی ته‌مانده مدل‌های بروکس و کوری (۱۹) و ونگنوختن (۲۹) و α ، λ_C ، λ_{BC} ، h_{bC} ، h_{bBC} و m و n پارامترهای معادله‌ها هستند. در این پژوهش از ۱۲ تابع انتقالی پارامتریک داخلی و خارجی (به نام‌های اختصاری PTF1 تا PTF12) برای مدل‌های بروکس و کوری (۱۹)، کمپیل (۲۰) و ونگنوختن (۳۰) استفاده شده است که به دلیل حجم وسیع معادله‌های موجود از ارائه آنها صرفنظر شده و تنها به این توابع همراه با متغیرهای مورد نیاز هر تابع اشاره شده است.

PTF1: توابع راولز و براکنسیک (۲۴) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای رطوبت حجمی اشباع و درصد‌های رس و شن استفاده شده است.

PTF2: توابع وریکن و همکاران (۳۱) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری، درصد ماده آلی و درصد‌های رس و شن استفاده شده است.

PTF3: توابع وستن (۳۳) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری، درصد ماده آلی و درصد رس استفاده شده است.

PTF4: توابع وستن و همکاران (۳۴) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری، درصد ماده آلی و درصد‌های رس و سیلت استفاده شده است. هم‌چنین در این تابع از پارامتر دیگری استفاده شده است که برای خاک سطحی (تا عمق ۶۰ سانتی‌متر) برابر یک و برای خاک زیرسطحی برابر صفر منظور شده است.

PTF5: توابع اول قربانی دشتکی و همایی (۱۲) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری و درصد‌های رس و شن استفاده شده است.

PTF6: توابع دوم قربانی دشتکی و همایی (۱۲) برای مدل ونگنوختن (۳۰): در این توابع از متغیرهای چگالی ظاهری، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک استفاده شده است. لازم به ذکر است که میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک دو پارامتر مهم خاک هستند که با

منطبق شده‌اند. در صورتی که مقدار GMER کمتر از یک شود مقادیر تخمین زده شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند و چنانچه مقدار GMER بیشتر از یک شود مقادیر تخمین زده شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند. هم‌چنین چنانچه مقدار GSDER برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند و افزایش GSDER نسبت به یک بیانگر افزایش فاصله بین مقادیر تخمین زده شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین شرایط آن است که مقادیر GMER و GSDER نزدیک به یک باشند (۳۲). به علاوه هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر بوده و مناسب‌تر است.

نتایج و بحث

اطلاعات آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک‌های به کار رفته در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول خاک‌ها به سه دسته کلی تقسیم شده‌اند: خاک‌های با بافت ریز شامل بافت‌های رس سیلتی و لوم رس سیلتی (۱۰ خاک)، خاک‌های با بافت میانه شامل بافت‌های لوم و سیلت لوم (۱۳ خاک) و خاک‌های با بافت درشت شامل بافت‌های شن لومی و لوم شنی (۷ خاک). چنانچه دیده می‌شود ۳۰ نمونه خاک به کار رفته در این پژوهش شامل شش بافت خاک می‌شود و لذا تنوع بافتی خاک‌ها نسبتاً مناسب می‌باشد. مقادیر میانگین و حداکثر پارامترهای آماری RMSE، GMER و GSDER برای خاک‌های با بافت ریز، میانه و درشت به ترتیب در جدول‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در این جدول‌ها برای هر یک از گروه‌های بافتی ذکر شده به طور جداگانه نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشد.

بافت‌های ریز

با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر RMSE ارائه شده در جدول ۲ (برحسب مترمکعب بر مترمکعب) برای کلیه

درصدهای رس و شن استفاده شده است. برای ارزیابی ۱۲ تابع انتقالی پارامتریک ذکر شده از ۳۰ نمونه خاک زراعی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در مناطق استهبان، بیضا، زرقان، فسا و مرودشت در استان فارس استفاده شد. پس از تهیه نمونه‌های خاک و انتقال آنها به آزمایشگاه، بافت خاک شامل درصد ذرات رس، سیلت و شن با ترکیب روش‌های هیدرومتر و شستشو با الک تعیین گردید و میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات هر خاک بر اساس روش ارائه شده توسط شیرازی و بورزما (۲۸) محاسبه شد. هم‌چنین منحنی مشخصه آب خاک هر نمونه خاک با ترکیب روش‌های ستون آویزان برای مکش‌های صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر (معادل صفر، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ کیلوپاسکال) و دستگاه صفحات فشاری برای مکش‌های ۳۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (معادل ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ متر) اندازه‌گیری گردید. مقدار ماده آلی هر خاک از روش آزمایشگاهی والکلی-بلک، مقدار چگالی ظاهری با استفاده از استوانه‌های نمونه‌برداری خاک و pH هر خاک نیز با استفاده از pH متر اندازه‌گیری شدند. برای ارزیابی نتایج نیز از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) به صورت روابط زیر استفاده گردید (۲۹):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M_i - E_i)^2}{N}} \quad [4]$$

$$e_i = \frac{E_i}{M_i} \quad [5]$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{N} \sum \ln(e_i)\right) \quad [6]$$

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{N-1} \sum [\ln(e_i) - \ln(GMER)]^2\right)^{0/5}\right] \quad [7]$$

در معادله‌های فوق e_i نسبت خطا، E_i و M_i به ترتیب رطوبت حجمی خاک تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده در هر مکش و N تعداد داده‌ها در هر خاک می‌باشد. چنانچه مقدار GMER برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین زده شده بر یکدیگر

جدول ۱. اطلاعات آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک‌های به کار رفته در این تحقیق.

گروه بافتی	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	میانگین قطر		چگالی ظاهری (گرم بر سانتی مترمکعب)	درصد ماده آلی	اسیدیته (pH)
				هندسی (میلی متر)	هندسی			
بافت ریز	۲۸	۵۰	۴	۰/۰۰۷	۱/۱۷	۱/۱۱	۷/۵	حدافل
	۴۶	۶۲	۱۸	۰/۰۲۰	۱/۴۳	۲/۱۸	۸/۱	حداکثر
	۳۴	۵۶	۱۰	۰/۰۱۳	۱/۲۸	۱/۷۲	۷/۹	میانگین
بافت میانه	۹	۴۰	۱۸	۰/۰۲۱	۱/۰۸	۱/۱۵	۷/۳	حدافل
	۲۷	۵۶	۵۱	۰/۱۲۷	۱/۶۶	۳/۳۵	۸/۰	حداکثر
	۱۷	۵۱	۳۳	۰/۰۵۸	۱/۳۰	۲/۰۲	۷/۷	میانگین
بافت درشت	۱	۱۶	۵۴	۰/۱۵۱	۱/۵۵	۰/۲۴	۷/۵	حدافل
	۹	۴۰	۸۰	۰/۴۳۱	۱/۶۹	۱/۱۷	۸/۰	حداکثر
	۵	۲۵	۷۰	۰/۳۰۷	۱/۶۱	۰/۵۶	۷/۷	میانگین

جدول ۲. مقادیر میانگین و حداکثر پارامترهای آماری برای کلیه خاک‌های با بافت ریز.

تابع پارامتریک	میانگین RMSE	حداکثر RMSE	میانگین GMER	حداکثر GMER	میانگین GSDER	حداکثر GSDER
PTF1	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۴۴	۰/۵۵	۱/۴۵	۱/۵۷
PTF2	۰/۱۹	۰/۲۹	۱/۶۳	۲/۳۴	۱/۳۸	۱/۵۲
PTF3	۰/۰۳	۰/۰۸	۱/۰۸	۱/۳۷	۱/۰۸	۱/۱۶
PTF4	۰/۰۳	۰/۰۹	۱/۰۸	۱/۳۸	۱/۰۷	۱/۱۵
PTF5	۰/۰۷	۰/۰۹	۱/۰۶	۱/۲۶	۱/۱۷	۱/۲۶
PTF6	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۸۳	۰/۹۲	۱/۴۶	۱/۵۴
PTF7	۰/۰۸	۰/۱۵	۱/۲۴	۱/۶۰	۱/۱۲	۱/۲۳
PTF8	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۸۸	۱/۳۵	۱/۳۹	۱/۶۴
PTF9	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۸۳	۱/۰۹	۱/۳۳	۱/۳۹
PTF10	۰/۰۴	۰/۰۷	۱/۰۵	۱/۳۳	۱/۱۱	۱/۱۸
PTF11	۰/۰۴	۰/۰۸	۱/۰۷	۱/۳۹	۱/۱۲	۱/۲۱
PTF12	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۸۶	۱/۰۷	۱/۰۹	۱/۱۵

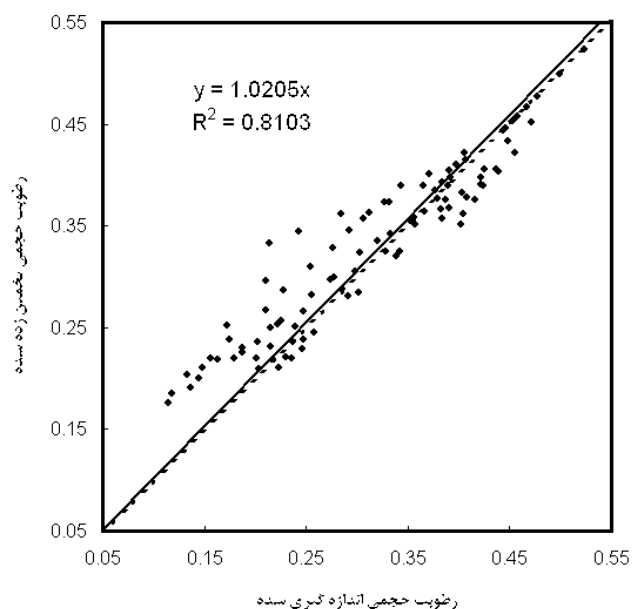
از خاک‌ها امکان‌پذیر نبوده است، زیرا برخی از پارامترهای معادله‌های مورد نظر به گونه‌ای می‌شوند که محاسبات ریاضی آن تابع امکان‌پذیر نمی‌شود و لذا این توابع به طور کلی از بررسی در این گروه بافتی حذف شده‌اند. در این گروه بافتی توابع فوق شامل توابع PTF5، PTF6 و PTF9 می‌باشند. در حالی که پژوهش‌های ترابی فارسانی و قهرمان (۱) برای دو خاک با بافت سیلت لوم و یک خاک با بافت لوم نشان داده است که توابع PTF5 و PTF6 برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک مناسب می‌باشند. همچنین پژوهش‌های مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) نشان داده است که توابع PTF5 و PTF6 برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک مناسب بوده و از طرف دیگر تابع PTF9 (مدل اصلاح شده سپاسخواه و بندار) نسبت به تابع PTF7 (مدل اولیه سپاسخواه و بندار) منجر به بهبود تخمین منحنی مشخصه در سه خاک با بافت لوم و سه خاک با بافت لوم رسی شده است که مطابق با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نمی‌باشد. از جمله دلایل تفاوت نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با سایر پژوهش‌های ذکر شده می‌توان به تفاوت اقلیم منطقه و کانی‌های رسی خاک‌ها اشاره نمود.

بنابراین با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر RMSE ارائه شده در جدول ۳ (برحسب مترمکعب بر مترمکعب) برای کلیه خاک‌های این گروه بافتی دیده می‌شود که به ترتیب توابع PTF4، PTF7، PTF3، PTF11 و PTF2 مناسب‌ترین گزینه‌ها می‌باشند. همچنین با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر GMER به ترتیب توابع PTF7، PTF2، PTF4، PTF5 و PTF11 با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر GSDER به ترتیب توابع PTF11، PTF10، PTF4، PTF3 و PTF2 مناسب‌ترین گزینه‌ها می‌باشند. به طور کلی برای این گروه بافتی توابع PTF7 و PTF4 مناسب‌تر می‌باشند. لذا تابع داخلی اولیه سپاسخواه و بندار (۲۶) برای این گروه بافتی بسیار مناسب است و میانگین مقدار GMER آن (۱/۰۱) نیز بسیار به عدد یک نزدیک است. این در حالی است که پژوهش‌های مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) نشان داده است که این تابع برای تخمین منحنی مشخصه آب

خاک‌های این گروه بافتی دیده می‌شود که به ترتیب توابع PTF3، PTF4، PTF10، PTF11 و PTF12 مناسب‌ترین گزینه‌ها می‌باشند. همچنین با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر GMER به ترتیب توابع PTF10، PTF5، PTF11، PTF3 و PTF4 با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر GSDER به ترتیب توابع PTF4، PTF3، PTF10، PTF12 و PTF11 مناسب‌ترین گزینه‌ها می‌باشند. به طور کلی برای این گروه بافتی توابع PTF3 و PTF4 مناسب‌تر می‌باشند که با توجه به میانگین مقادیر GMER در هر دو تابع مقادیر تخمین‌زده شده رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی می‌باشند. پژوهش‌های ترابی فارسانی و قهرمان (۱) برای دو خاک با بافت سیلت لوم و یک خاک با بافت لوم (خاک‌های با بافت میانه نه ریز) نیز نشان داده است که توابع PTF3 و PTF4 برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک مناسب می‌باشند. در شکل ۱ پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده از تابع PTF3 در اطراف خط یک به یک (نشان داده شده به صورت خط چین) برای کلیه خاک‌های این گروه بافتی ارائه شده است. چنانچه در این شکل دیده می‌شود نقاط به خوبی در اطراف خط یک به یک پراکنده شده‌اند که نشان‌دهنده مناسب بودن تابع PTF3 در خاک‌های این گروه بافتی می‌باشد. بنابراین توابع انتقالی داخلی ارائه شده برای این گروه بافتی در مقایسه با توابع انتقالی خارجی چندان مناسب نیستند. همچنین نتایج نشان داد که برای این گروه بافتی بین توابع وستن (۳۳) و وستن و همکاران (۳۴) تفاوت چندانی وجود ندارد.

بافت‌های میانه

چنانچه در جدول ۳ دیده می‌شود برای برخی از توابع در برخی از خاک‌های این گروه مقداری برای پارامترهای آماری RMSE، GMER و GSDER ارائه نشده است. دلیل این موضوع آن است که با توجه به معادله‌های آن تابع و مقادیر عددی متغیرهای ورودی آن تابع، تخمین منحنی مشخصه برای برخی



شکل ۱. پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه گیری شده و تخمین زده شده از تابع PTF3 در اطراف خط یک به یک برای کلیه خاک‌های با بافت ریز

جدول ۳. مقادیر میانگین و حداکثر پارامترهای آماری برای کلیه خاک‌های با بافت میانه

تابع پارامتریک	میانگین RMSE	حداکثر RMSE	میانگین GMER	حداکثر GMER	میانگین GSDER	حداکثر GSDER
PTF1	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۴۵	۱/۷۵	۱/۹۳
PTF2	۰/۱۰	۰/۲۵	۱/۰۶	۱/۹۴	۱/۲۳	۱/۴۱
PTF3	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۷۸	۱/۲۰	۱/۲۲	۱/۵۰
PTF4	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۸۴	۱/۱۶	۱/۲۱	۱/۳۹
PTF5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF6	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF7	۰/۰۸	۰/۱۲	۱/۰۱	۱/۳۶	۱/۲۹	۱/۴۴
PTF8	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۷۷	۱/۲۴	۱/۳۹	۱/۶۷
PTF9	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF10	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۷۲	۱/۱۲	۱/۱۹	۱/۴۲
PTF11	۰/۰۹	۰/۱۸	۰/۸۰	۱/۱۸	۱/۱۵	۱/۳۱
PTF12	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۶۲	۰/۸۸	۱/۲۶	۱/۴۴

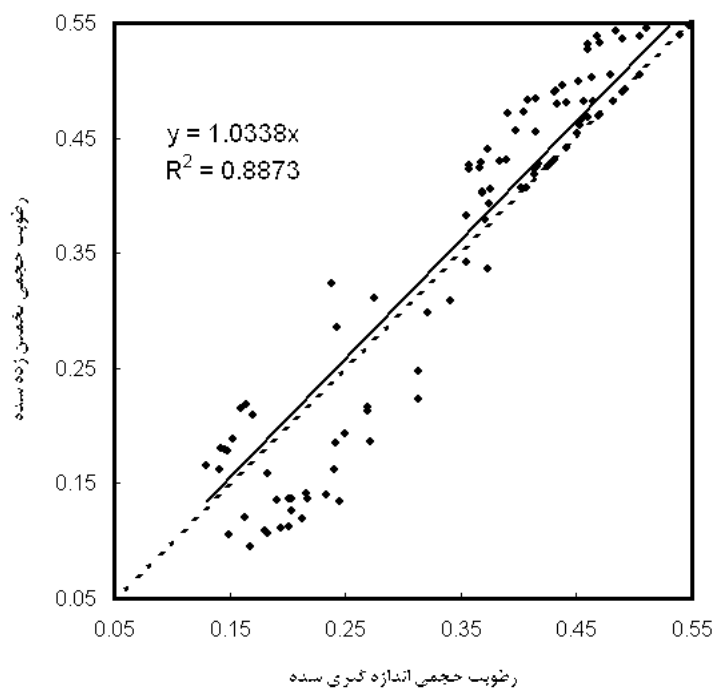
خاک در خاک‌های با بافت لوم و لوم رسی مناسب نیست. دلیل این موضوع می‌تواند به تفاوت ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های به کار رفته در دو پژوهش از جمله کانی‌های رس خاک ارتباط داشته باشد. از طرف دیگر چنانچه ذکر شد تابع خارجی PTF4 همانند گروه خاک‌های با بافت ریز برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک مناسب است، البته با این تفاوت که با توجه به میانگین مقادیر GMER برای خاک‌های با بافت میانه بر خلاف خاک‌های با بافت ریز، مقادیر تخمین زده شده رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی می‌باشند. هم‌چنین مناسب بودن تابع خارجی PTF4 برای خاک‌های با بافت میانه با نتایج تحقیقات ترابی فارسانی و قهرمان (۱) برای دو خاک با بافت سیلت لوم و یک خاک با بافت لوم مطابقت دارد. در شکل ۲ نیز پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از تابع PTF7 در اطراف خط یک به یک (نشان داده شده به صورت خط چین) برای کلیه خاک‌های این گروه بافتی ارائه شده است. چنانچه در این شکل دیده می‌شود نقاط به خوبی در اطراف خط یک به یک پراکنده شده‌اند که نشان‌دهنده مناسب بودن تابع PTF7 در خاک‌های این گروه بافتی است.

بافت‌های درشت

چنانچه در جدول ۴ دیده می‌شود برای برخی از توابع در برخی از خاک‌های این گروه مانند گروه خاک‌های با بافت میانه مقداری برای پارامترهای آماری RMSE، GMER و GSDER ارائه نشده است که دلیل این موضوع مشابه دلیل ذکر شده برای خاک‌های با بافت میانه است، زیرا بعضی از پارامترهای معادله‌های مورد نظر به گونه‌ای می‌شوند که محاسبات ریاضی آن تابع امکان‌پذیر نمی‌شود. بنابراین به طور کلی توابع PTF5، PTF6 و PTF9 همانند گروه خاک‌های با بافت میانه که همگی توابع داخلی هستند از بررسی در این گروه بافتی حذف شدند. هم‌چنین تابع داخلی PTF7 که برای خاک‌های با بافت میانه مناسب‌ترین گزینه بود و تابع خارجی PTF3 که برای خاک‌های

با بافت ریز جزء گزینه‌های مناسب بود، برای خاک‌های با بافت درشت همانند توابع داخلی PTF5، PTF6 و PTF9 از بررسی در این گروه بافتی حذف شدند. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که توابع مورد استفاده در این گروه بافتی نسبت به دو گروه دیگر دارای دقت کمتری برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک هستند. با این حال با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر RMSE ارائه شده در جدول ۴ (برحسب مترمکعب بر مترمکعب) برای کلیه خاک‌های این گروه بافتی دیده می‌شود که به ترتیب توابع PTF4، PTF11، PTF10 و PTF2 مناسب‌ترین گزینه‌ها می‌باشند. هم‌چنین با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر GMER به ترتیب توابع PTF4، PTF12، PTF11، PTF2 و PTF10 و با توجه به میانگین و حداکثر مقادیر GSDER به ترتیب توابع PTF8، PTF12، PTF11، PTF2 و PTF4 مناسب‌ترین گزینه‌ها می‌باشند.

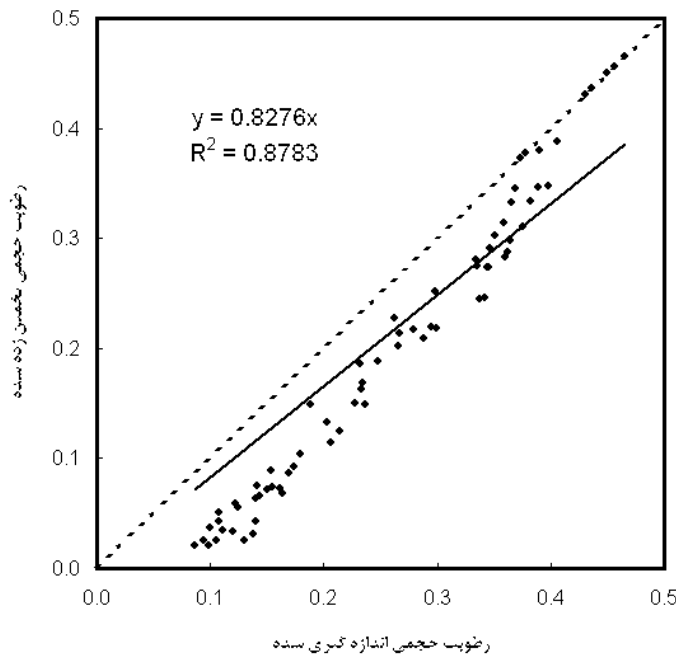
به طور کلی برای این گروه بافتی تابع PTF4 مناسب‌ترین گزینه برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک است که با توجه به میانگین مقادیر GMER در این تابع مقادیر تخمین زده شده رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی می‌باشند. در شکل ۳ پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از تابع PTF4 در اطراف خط یک به یک (نشان داده شده به صورت خط چین) برای کلیه خاک‌های این گروه بافتی ارائه شده است. چنانچه در این شکل نیز دیده می‌شود مقادیر تخمین زده شده رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی هستند. لازم به ذکر است که تابع PTF4 برای بافت‌های ریز نیز مناسب‌ترین گزینه بود با این تفاوت که برای آن گروه مقادیر تخمین زده شده رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی می‌باشند. هم‌چنین این تابع برای بافت‌های میانه نیز مناسب است و همانند خاک‌های با بافت درشت مقادیر تخمین زده شده رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت



شکل ۲. پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه گیری شده و تخمین زده شده از تابع PTF7 در اطراف خط یک به یک برای کلیه خاک‌های با بافت میانه

جدول ۴. مقادیر میانگین و حداکثر پارامترهای آماری برای کلیه خاک‌های با بافت درشت

تابع پارامتریک	میانگین RMSE	حداکثر RMSE	میانگین GMER	حداکثر GMER	میانگین GSDER	حداکثر GSDER
PTF1	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۳۲	۱/۸۷	۱/۹۸
PTF2	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۴۹	۱/۵۰	۱/۷۹
PTF3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF4	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۶۳	۰/۷۲	۱/۵۲	۱/۸۲
PTF5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF6	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF7	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF8	۰/۳۹	۰/۶۷	۲/۴۷	۴/۰۴	۱/۲۴	۱/۵۵
PTF9	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PTF10	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۳۱	۰/۴۶	۱/۶۱	۲/۰۲
PTF11	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۵۴	۱/۴۹	۱/۷۷
PTF12	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۵۵	۰/۷۰	۱/۲۶	۱/۴۲



شکل ۳. پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه گیری شده و تخمین زده شده از تابع PTF4 در اطراف خط یک به یک برای کلیه خاک‌های با بافت درشت

ارائه توابع انتقالی پارامتریک جدیدی برای این گروه‌های بافتی برای خاک‌های استان فارس است.

۳. توابع اول و دوم قربانی دشتکی و همایی (۱۲) برای مدل ونگنوختن (۳۰) و توابع اصلاح شده سپاسخواه و بندار (۲۶) به وسیله مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) برای مدل ونگنوختن (۳۰) برای خاک‌های مورد بررسی در استان فارس مناسب نمی‌باشند که این موضوع با نتایج ارائه شده به وسیله ترابی فارسانی و قهرمان (۱) و مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) همخوانی ندارد. بنابراین موضوع فوق نشان‌دهنده آن است که توابع انتقالی پارامتریک موجود برای خاک‌های تمام مناطق مناسب نمی‌باشند و لذا ارزیابی این توابع برای خاک‌های مورد نظر در هر پژوهش جدید ضروری است.

۴. دو تابع اصلاح شده قربانی دشتکی و همایی (۱۲) و سپاسخواه و بندار (۲۶) به وسیله مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) برای مدل ونگنوختن (۳۰) نسبت به توابع اولیه قربانی دشتکی

حجمی می‌باشند. بنابراین همانند خاک‌های با بافت ریز، توابع انتقالی داخلی ارائه شده برای این گروه بافتی در مقایسه با توابع انتقالی خارجی چندان مناسب نیستند.

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که:

۱. توابع انتقالی پارامتریک مدل ونگنوختن (۳۰) برای خاک‌های مورد بررسی در استان فارس مناسب‌تر از توابع انتقالی پارامتریک مدل‌های بروکس و کوری (۱۹) و کمپیل (۲۰) می‌باشد که این موضوع با متداول‌تر بودن مدل ونگنوختن برای برازش منحنی مشخصه آب خاک که در پژوهش‌های بسیار زیادی به آن اشاره شده است، همخوانی دارد.
۲. ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک ذکر شده در این پژوهش برای خاک‌های با بافت ریز و میانه مناسب‌تر از خاک‌های با بافت درشت می‌باشد، بنابراین این موضوع نشان‌دهنده لزوم

۶. در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که تابع پارامتریک خارجی وستن و همکاران (۳۳) که برای خاک‌هایی در اروپا استخراج شده‌اند، مناسب‌ترین تابع برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در خاک‌های مورد بررسی در استان فارس است و این تابع نسبت به توابع پارامتریک داخلی ارجحیت دارد. گرچه شرایط خاک‌های به کار رفته برای استخراج تابع پارامتریک وستن و همکاران (۳۳) با شرایط خاک‌های مورد بررسی در استان فارس مشابه نیست و تناسب اقلیمی نیز بین این مناطق وجود ندارد، ولی تجزیه و تحلیل‌های انجام شده حاکی از مناسب بودن این تابع می‌باشد.

یکی از دلایل موجود می‌تواند تعداد زیاد خاک‌های به کار رفته برای استخراج تابع پارامتریک وستن و همکاران (۳۳) باشد. بنابراین مشابه بودن شرایط خاک‌ها و تناسب اقلیمی تضمینی برای مناسب بودن توابع انتقالی استخراج شده در یک منطقه برای مناطق مشابه نمی‌باشد و چنانچه ذکر شد این موضوع نشان‌دهنده ضرورت ارزیابی توابع انتقالی موجود برای خاک‌های هر منطقه قبل از استفاده از آن توابع می‌باشد. گرچه هدف اصلی از به کار بردن توابع انتقالی منحنی مشخصه آب خاک آن است که دیگر نیازی به اندازه‌گیری وقت‌گیر و پرهزینه این منحنی نباشد، ولی با توضیحات ذکر شده ضروری است که ابتدا منحنی مشخصه آب خاک و سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی تعدادی از خاک‌های آن منطقه اندازه‌گیری شوند و پس از ارزیابی توابع انتقالی موجود بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده، مناسب‌ترین تابع را برای منطقه تعیین نمود تا از آن به بعد بتوان از آن توابع برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک استفاده نمود.

و همایی (۱۲) و سپاسخواه و بندار (۲۶) منجر به بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک در خاک‌های مورد بررسی در استان فارس نشدند که این موضوع برخلاف نتایج به دست آمده به وسیله مؤذن‌زاده و همکاران (۱۵) است. بنابراین این موضوع نیز نشان‌دهنده لزوم ارزیابی توابع انتقالی موجود برای خاک‌های مورد نظر در هر پژوهش پیش از استفاده از آن توابع می‌باشد. ۵. نتایج این پژوهش نشان داد که توابع انتقالی مناسب برای خاک‌های یک منطقه ممکن است برای خاک‌هایی با همان شرایط بافتی در مناطق دیگر مناسب نباشد. از مهم‌ترین دلایل ممکن می‌توان به تفاوت در شکل و نوع کانی‌های رس خاک، تفاوت در مقدار سطح ویژه و ماده آلی خاک و تفاوت در اقلیم مناطق اشاره نمود. از طرف دیگر ممکن است توابع انتقالی مناسب برای خاک‌های یک منطقه برای خاک‌هایی با بافت متفاوت در منطقه‌ای دیگر مناسب باشد، گرچه این موضوع دلیل علمی قابل توجهی ندارد.

هم‌چنین شرایط اولیه خاک‌هایی که توابع انتقالی بر اساس آنها استخراج شده‌اند، نقش قابل توجهی در مناسب بودن این توابع برای خاک‌های مناطق دیگر با شرایط یکسان دارند. گرچه در بعضی شرایط توابع انتقالی استخراج شده برای خاک‌های یک منطقه ممکن است برای خاک‌هایی متفاوت در مناطق دیگر نیز مناسب باشند که این موضوع نیز دلیل علمی قابل توجهی ندارد. به طور کلی می‌توان گفت توابعی مناسب هستند که با استفاده از تعداد زیادی از نمونه‌های خاک استخراج شده‌اند، زیرا در این صورت حتی اگر خاک‌ها دارای محدوده خاصی از بافت هم باشند، تنوع ویژگی‌های آنها زیاد است و لذا برای خاک‌های مناطق دیگر می‌توانند مناسب‌تر باشند.

منابع مورد استفاده

۱. ترابی فارسانی، ن. و ب. قهرمان. ۱۳۸۶. مقایسه چند تابع انتقالی متداول برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در چند خاک ایران. مجله آبیاری و زه‌کشی ایران ۱(۲): ۴۵-۵۷.
۲. خداوردیلو، ح. و م. همایی. ۱۳۸۱. اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۳(۱۰): ۳۵-۴۶.

۳. خوشنودیزدی، ع. ا. و ب. قهرمان. ۱۳۸۳. بررسی روابط بافت خاک و پارامتر مقیاس‌بندی برای برآورد رطوبت خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۵(۲۰): ۱۷-۳۴.
۴. رخشنده رو، غ. ر. و ع. اسلامی حقیقت. ۱۳۸۷. ارزیابی منحنی مشخصه آب و خاک بر اساس تئوری تخلخل موضعی. آب و فاضلاب ۶۶: ۶۶-۷۶.
۵. رضایی، ع. و م. ر. نیشابوری. ۱۳۸۱. تخمین منحنی خصوصیات آب خاک از منحنی توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک. دانش کشاورزی ۱۲(۳): ۲۹-۳۷.
۶. رضایی، ح. م. ر. نیشابوری و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۸۴. ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس توزیع دانه‌بندی ذرات خاک. دانش کشاورزی ۱۵(۲): ۱۱۹-۱۳۰.
۷. فرخیان فیروزی، ا. و م. همایی. ۱۳۸۴. ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک‌های گچی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۶(۲۴): ۱۲۹-۱۴۲.
۸. فولادمند، ح. ر. ۱۳۸۶. بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۴۱-الف): ۶۳-۷۳.
۹. فولادمند، ح. ر. ۱۳۸۸. تخمین نقطه‌ای منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از سطح ویژه و میانگین هندسی قطر ذرات خاک. علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۶(۱): ۲۳۱-۲۳۳.
۱۰. فولادمند، ح. ر. ۱۳۹۰. تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از چند روش محاسبه عامل مقیاس‌بندی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۸(۱): ۱۹۹-۲۱۳.
۱۱. فولادمند، ح. ر. ع. ر. سپاسخواه و ج. نیازی. ۱۳۸۳. تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۸(۳): ۱-۱۳.
۱۲. قربانی دشتکی، ش. و م. همایی. ۱۳۸۱. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۳(۱۲): ۱-۱۵.
۱۳. قربانی دشتکی، ش. و م. همایی. ۱۳۸۳. برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای. علوم کشاورزی ۱۰(۴): ۱۵۷-۱۶۶.
۱۴. قنبریان علویجه، ب. ع. م. لیاقت، م. شرفا و س. مقیمی عراقی. ۱۳۸۷. پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۹(۱): ۶۳-۸۰.
۱۵. موذن‌زاده، ر. ب. قهرمان، ک. داوری و ع. ا. خوشنودیزدی. ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد چند تابع انتقالی داخلی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳(۴): ۵۵-۶۶.
۱۶. میرخانی، ر. م. شعبانپور شهرستانی و س. سعادت. ۱۳۸۴. برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی. دانش کشاورزی ۱۵(۳): ۱۵۱-۱۶۲.
17. Arya, L. M. and J. F. Paris. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 45: 1023-1030.
18. Arya, L. M., F. J. Leij, M. Th. van Genuchten and P. J. Shouse. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 63: 510-519.
19. Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper No. 3., Fort Collins, USA.
20. Campbell, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117: 311-314.

21. Fooladmand, H. R. 2011. Pedotransfer functions for point estimation of soil moisture characteristic curve in some Iranian soils. *Afr. J. Agric. Res.* 6(6): 1586-1591.
22. Ghanbarian-Alavijeh, B. and A. M. Liaghat. 2009. Evaluation of soil texture data for estimating soil water retention curve. *Can. J. Soil Sci.* 89(4): 461-471.
23. Givi, J., S. O. Prasher and R. M. Patel. 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agric. Water Manage.* 70: 83-96.
24. Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. PP. 275-300. *In: H. J. Morel-Seytoux (Ed.), Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling- Theory and Practice.* Kluwer Academic Pub., Dordrecht.
25. Rawls, W. J., L. R. Ahuja and D. L. Brakensiek. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. PP. 329-341. *In: M. Th. van Genuchten, F. J. Leij and L. J. Lund (Eds.), Proc. Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils.* Riverside, CA.
26. Sepaskhah, A. R. and H. Bondar. 2002. Estimating van Genuchten soil water retention curve from some soil physical properties. *Iran Agric. Res.* 21: 105-118.
27. Sepaskhah, A. R. and M. R. Rafiee. 2008. Evaluation of scaling parameter to predict soil water characteristic curve using improved particle-size distribution. *Iran. J. Sci. Technol.* 32(B5): 549-556.
28. Shirazi, M. A. and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 142-147.
29. Tietje, O. and V. Hennings. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69: 71-84.
30. van Genuchten, M. TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44: 892-898.
31. Vereecken, H., J. Maes and J. Feyen. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.* 149: 1-12.
32. Wagner, B., V. R. Tarnawski, V. Hennings, U. Muller, G. Wessoleu and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma* 102: 275-297.
33. Wösten, J. H. M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. PP. 221-245. *In: E. G. Gregorich and M. R. Carter (Eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health.* Developments in Soils Science. Elsevier. Pub., USA.
34. Wösten, J. H. M., A. Lilly, A. Nemes and C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169-185.