

برآورد پارامترهای شاخه خشک و خیس شدن منحنی رطوبتی بروکس - کوری با استفاده از توابع انتقالی

رؤیا طلوعی^{۱*}، محمدرضا نیشابوری^۲، علی رسول‌زاده^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۸/۰۵

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Roya_Toluee@hotmail.com

چکیده

در بیشتر مطالعات برای تعیین منحنی رطوبتی خاک $\theta(h)$ از طریق توابع انتقالی، شاخه خشک شدن بیشتر مورد توجه بوده و مطالعه‌ای در زمینه ایجاد توابع توصیف‌کننده شاخه خیس‌شدن صورت نگرفته است. در توصیف برخی پدیده‌های مهم طبیعی از جمله آبیاری و نفوذ، شاخه خیس‌شدن $\theta(h)$ مورد نیاز است. بدین منظور داده‌های تجربی شاخه‌های خیس و خشک شدن به ترتیب با استفاده از روش مزرعه‌ای شانی و دستگاه صفحه‌های فشاری در ۲۴ خاک مختلف حاصل شد. پارامترهای بروکس-کوری از طریق برازش مدل به داده‌های تجربی برای هر دو شاخه محاسبه شدند. رابطه رگرسیونی غیرخطی چند متغیره بین هرکدام از پارامترهای مدل بروکس-کوری با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک برقرار و توابع مختلف جهت برآورد آن‌ها برای هر دو شاخه خشک و خیس‌شدن ارائه شد. برای ارزیابی صحت تخمین توابع از ملاک‌های آماری شاخص مطابقت اصلاح‌شده، جذر میانگین مربعات خطای نسبی، میانگین هندسی نسبت خطا و انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا استفاده شد. تمام توابع از نوع معادلات رگرسیونی غیرخطی چندگانه با R^2 هایی در محدوده ۰/۸۰ تا ۰/۹۰ به دست آمد. با توجه به تکرار ویژگی‌های خاک در توابع (به‌عنوان متغیر مستقل) به نظر می‌رسد ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری به‌عنوان دو ویژگی غالب در شکل‌گیری شاخه خشک و خیس‌شدن تابع $\theta(h)$ و همچنین رفتار پس‌ماند نقش اساسی دارند. نتایج تحلیل حساسیت نیز اهمیت این دو متغیر را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: پدیده پس‌ماند، توابع انتقالی خاک، روش شانی، شاخه خشک و خیس‌شدن، منحنی رطوبتی خاک

Estimating Parameters of Brooks-Corey Soil Water Retention Curve for Drying and Wetting Branches by Pedotransfer Functions

R Toluee^{1*}, MR Neyshabouri², A Rasoulzadeh³

Received: 24 February 2014 Accepted: 27 October 2014

1- Former MSc Student, Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

2- Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

3- Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric. and Natural Resources Technology, Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran

*Corresponding author, E-mail: Roya_Toluee@hotmail.com

Abstract

In most studies related to the prediction of soil water retention curve ($\theta(h)$) by pedotransfer functions (PTFs), its drying branch has been worked out and almost no study has been accomplished in developing PTFs for the wetting branch. The latter is required for describing some important natural phenomena such as irrigation and infiltration. Therefore, experimental data presenting the wetting and drying branches were obtained by using respectively Shani field method and pressure plate apparatus in 24 diverse soils. The Brooks-Corey parameters were calculated by fitting the model to the experimental data for the both branches. Each parameter of Brooks-Corey model was regressed against various soil attributes by using of the multivariable curvilinear regression and appropriate PTFs were developed to predict the parameters for both branch. Statistical criteria such as modified index of agreement, relative root mean squares error, geometric mean and geometric standard deviation of error ratio were adopted for accuracy assessment of the PTFs. All the PTFs developed were non-linear multiple regression with R^2 ranged from 0.80 to 0.90. According to soil attributes contribution to the developed PTFs, organic matter and bulk density appeared as the two dominant soil properties that played major role in shaping both drying and wetting branches of the $\theta(h)$ as well as the hysteresis. Results of sensitivity analysis also confirmed the importance of these two variables.

Keywords: Drying and wetting branches, Hysteresis phenomena, Pedotransfer functions, Shani method, Soil water retention curve

مقدمه

همکاران ۲۰۰۶، ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۲). بافت و ساختمان خاک، پیوستگی و شکل خلل و فرج، تراکم خاک، درجه حرارت و املاح خاک از جمله عوامل مؤثر در شکل منحنی رطوبتی هست. در کنار این عوامل وقوع پدیده پس‌ماند رطوبتی نیز از پیچیدگی‌های منحنی مذکور است (عباسی ۱۳۸۶). منحنی رطوبتی بسته به

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی موردنیاز در شبیه‌سازی جریان آب و املاح در پروفیل خاک که اهمیت پایه‌ای در فیزیک خاک نیز دارد منحنی رطوبتی خاک هست. این ویژگی رابطه بین پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک را نشان می‌دهد (اسلام و

مقادیر $h(\theta)$ را در دامنه وسیعی از رطوبت خاک به صورت پیوسته تخمین زده و می توان آن ها را به طور مستقیم در مدل های ریاضی برای شبیه سازی حرکت آب در خاک بکار گرفت (وستن و همکاران ۲۰۰۱). توابع بروکس- کوری (۱۹۶۴) و ون گنوختن (۱۹۸۰) در این دسته جای می گیرند. دسته سوم توابع نیمه فیزیکی هستند که منحنی رطوبتی را صرفاً از روی ویژگی های فیزیکی خاک برآورد می کنند. مبتکرین این روش بلومن (۱۹۸۰) و آریا- پاریس (۱۹۸۱) می باشند.

شینوست و همکاران (۱۹۹۷) و میناسنی و همکاران (۱۹۹۹) از میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات برای پیش بینی منحنی رطوبتی خاک استفاده کردند. میزان ماده آلی به طور موفقیت آمیزی در تحقیقات راولز و همکاران (۱۹۸۲) و وستن و همکاران (۱۹۹۹) به عنوان متغیر ورودی بکار رفت. آنگارو و همکاران (۲۰۰۵) حضور پارامتری از ساختمان خاک را در افزایش دقت برآورد منحنی رطوبتی توصیه کردند. نمس و راولز (۲۰۰۶) کارآمدی تعدادی از ویژگی های توزیع اندازه ذرات را در برآورد میزان رطوبت خاک در پتانسیل های ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلو پاسکال مورد بررسی قرار دادند. ایشان هیچ خصوصیتی را به عنوان عامل مؤثر در برآورد ویژگی های هیدرولیکی خاک معرفی ننمودند.

بسط و تعمیم کاربرد توابع انتقالی مشتق شده از داده های خاک های منطقه ای خاص، برای مناطق دیگر هنوز به طور قطعی رد یا تأیید نشده است. وستن و همکاران (۲۰۰۱) به احتیاط در استفاده از روش های غیرمستقیم به ویژه روش توابع انتقالی تأکید کردند. ایشان توابع انتقالی به دست آمده از مجموعه داده های خاک در یک منطقه را تنها برای منطقه دیگر با خاک مشابه و تاریخچه مدیریتی مشابه توصیه کردند.

منحنی رطوبتی دارای دو شاخه خشک شدن و خیس شدن^۲ هست. در بیشتر مطالعات، توابع انتقالی

این که خاک در حالت خشک شدن یا خیس شدن باشد دارای دو شاخه متمایز خشک و خیس شدن است. بالطبع این دو شاخه از نظر شکل و پارامترهای توصیف کننده آن با یکدیگر متفاوت خواهند بود (مقصود و همکاران ۲۰۰۴).

اندازه گیری مستقیم منحنی رطوبتی خاک زمان- بر، پرهزینه و در مواردی دارای خطاهای غیرقابل کنترل است. از طرفی به دلیل تغییرات مکانی- زمانی بالای این ویژگی ها، تعداد نمونه های زیادی برای توصیف دقیق آن ها در شرایط مزرعه نیاز است. بنابراین تلاش های زیادی برای توسعه روش های غیرمستقیم برآورد منحنی رطوبتی خاک انجام شده است. استفاده از روش های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی برای برآورد ویژگی های هیدرولیکی خاک امری اجتناب ناپذیر است. توابع انتقالی خاک^۱ برای توصیف وابستگی بین ویژگی های دیرپافت (مانند قابلیت نگهداری آب و هدایت هیدرولیکی خاک) با متغیرهای زودپافت (مانند بافت، ساختمان، جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی) به کار می روند (وستن و همکاران ۲۰۰۱).

توابع انتقالی عموماً به سه گروه توابع نقطه ای، پارامتریک و توابع نیمه فیزیکی تقسیم شده اند (تیت چی و تاپکن هینریش ۱۹۹۳). دسته اول توابع انتقالی نقطه ای هستند که میزان رطوبت را در پتانسیل های ماتریک خاصی (ترجیحاً رطوبت ظرفیت مزرعه ای و نقطه پژمردگی دائم) برآورد می نمایند. از این دسته توابع می توان به توابع راولز و همکاران (۱۹۸۲) و آهوچا و همکاران (۱۹۸۴) اشاره نمود. دسته دوم توابع انتقالی پارامتریک هستند. در این روش فرض می شود که رابطه مشخصی بین مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک در قالب یک مدل ریاضی مانند مدل ون گنوختن (۱۹۸۰) با تعداد پارامتر معین، وجود دارد. با استفاده از روش رگرسیونی و یا شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای آن برآورد می گردد. این توابع برخلاف توابع نقطه ای،

² Drying and wetting branch

¹ Pedo-transfer functions

جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر (فلینت و فلینت ۲۰۰۲)، کربن آلی به روش اکسایش تر (نلسون و سامرز ۱۹۹۶)، هدایت الکتریکی توسط دستگاه EC متر در عصاره گل اشباع و واکنش خاک توسط دستگاه pH متر در گل اشباع بکار گرفته شد. میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) و انحراف معیار هندسی (σ_g) با استفاده از روابط ارائه شده توسط شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) محاسبه شدند. نمونه‌های دست نخورده نیز توسط استوانه‌های فلزی با میانگین ارتفاع ۴ و قطر ۵ سانتی‌متر به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری به روش خشک کردن و توزین (گروسمن و رینش ۲۰۰۲) بکار گرفته شدند.

تعیین شاخه خشک شدن

نمونه‌های دست نخورده پس از اشباع در معرض مکش‌های کم (۱، ۳، ۷ و ۱۰ کیلوپاسکال) با استفاده از صفحه‌های متخلخل قیف هینز (دان و هاپمنس ۲۰۰۲) و مکش‌های بالاتر از ۱۰ کیلوپاسکال (۲۰، ۳۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) با استفاده از دستگاه صفحه‌های فشاری (کلوت ۱۹۸۶) قرار گرفت. قطع خروج آب از دستگاه در هر فشار به منزله پایان آزمایش و حصول تعادل بود. رطوبت جرمی خاک در حالت تعادل در مکش‌های مورد نظر از طریق توزین حالت تعادل و خشک شده در اتو، محاسبه شده و سپس از طریق جرم مخصوص ظاهری به رطوبت حجمی تبدیل گردید.

تعیین شاخه خیس شدن

شانی و همکاران (۱۹۸۷) با به کارگیری معادلات دو بعدی جریان ماندگار آب از سطح خیس شده به داخل خاک (وودینگ ۱۹۶۸)، روشی سریع و عملی در سطح مزرعه برای برآورد پارامترهای توابع $K(h)$ و $\theta(h)$ ارائه کردند. این روش به روش قطره چکان نیز معروف است. در این روش آب با دبی ثابت (Q) از یک مخزن از ارتفاع کم روی سطح خاک خشک ریزش می‌کند و در نتیجه پس از مدت کوتاهی یک ناحیه اشباع به شکل کم‌وبیش دایره‌ای شکل روی سطح خاک شکل می‌گیرد. اما ناحیه

برای تعیین شاخه خشک شدن منحنی ایجاد شده است. اما تاکنون مطالعه گسترده‌ای در زمینه ایجاد توابع توصیف کننده شاخه خیس شدن صورت نگرفته و به شاخه خیس شدن از این نظر توجهی نشده است. در صورتی که برای مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در خاک در حالت مرطوب یا خیس شدن مثل آبیاری و نفوذ آب، قاعدتاً بایستی از شاخه خیس شدن منحنی مذکور استفاده شود. لذا ضروری است توابع انتقالی نیز برای شاخه خیس شدن ایجاد شود. رضوی و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای به منظور شبیه سازی شاخه خیس شدن منحنی رطوبتی با استفاده از توابع انتقالی ایجاد شده برای شاخه خشک شدن منحنی مذکور، توابع منتشر شده موجود را قادر به شبیه سازی شاخه خیس شدن منحنی رطوبتی خاک‌ها نیافتند.

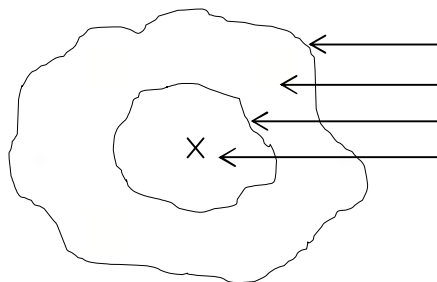
محدود بودن توابع توسعه یافته به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های کشورمان به عنوان یک راه حل عمده در صرفه جویی زمان و هزینه از یک سو، و اهمیت شاخه خیس شدن در مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در خاک در حالت مرطوب یا خیس شدن از سوی دیگر منجر به انجام این تحقیق با هدف توسعه توابع انتقالی برای شبیه سازی پارامترهای مدل بروکس-کوری (۱۹۶۴) برای هردو شاخه منحنی رطوبتی شد.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و اندازه گیری متغیرها

به منظور توسعه توابع انتقالی، ۲۴ نمونه خاک مختلف از اراضی کشاورزی شهرستان میانه واقع در شمال غرب ایران به صورت تصادفی انتخاب شد. نمونه برداری‌ها به صورت دست نخورده و دست نخورده در سه تکرار از عمق ۱۰-۰ سانتی متری تهیه گردید. نمونه‌های دست نخورده بعد از هوا خشک کردن و گذراندن از الک دو میلی متری، به منظور تعیین فراوانی نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتر (گی و اور ۲۰۰۲)،

این ناحیه با آهنگ کند شونده افزایش می‌یابد (شکل ۱).



جبهه رطوبتی (مرز بین خاک خشک و غیراشباع)
 ناحیه غیراشباع
 مرز بین ناحیه اشباع و غیراشباع
 محل ریزش آب روی سطح خاک با دبی قابل تنظیم

شکل ۱- شماتیک نواحی اشباع و غیراشباع در روش شانی و همکاران (۱۹۸۷).

α (دارای بعدی معکوس با بعد h) پارامترهای تجربی خاک می‌باشند.

روش شانی در ۲۴ مکان (شامل هشت کلاس بافتی رس، رس سیلتی، لوم رسی، لوم رسی، لوم سیلتی، لوم رس سیلتی، لوم رس سیلتی، لوم رسی شنی، لوم شنی)، برای هر مکان سه تکرار و در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک انجام شد. به منظور اجرای اندازه‌گیری‌ها، دستگاه مربوطه برای انجام آزمایش شانی ساخته شد. اجزای دستگاه به صورت ساده شامل ظرف ماریوت (مخزن آب)، شیر آب قابل تنظیم دبی قطره‌چکان و لوله شیشه‌ای تنظیم فشار بود. لوله شیشه‌ای برای تنظیم فشار هوای درون مخزن و در نهایت ثابت نگه‌داشتن دبی خروجی است.

برای اندازه‌گیری ابتدا دستگاه در وسط مکان کاملاً مسطح در حدود $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ و دارای خاک خشک قرار گرفت. به منظور مشخص نمودن رطوبت اولیه خاک، قبل از آزمایش صحرایی، نمونه‌برداری برای محاسبه رطوبت انجام پذیرفت. با توجه به اینکه در آزمایش شانی بایستی دبی‌ها متناسب با نوع خاک در محدوده‌ای اعمال شوند که شعاع ناحیه اشباع و غیراشباع به درستی تشکیل شوند، بنابراین قبل از آزمایش اصلی شانی، بیشترین دبی (دبی که بیشتر از آن، آب در خاک از همان ابتدای ریزش نفوذ نمی‌کرد و در سطح خاک جریان می‌یافت) و کمترین دبی (دبی که کمتر از آن، آب در خاک فقط نفوذ کرده و اصلاً ناحیه

توابع منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های شعاع ناحیه اشباع به عنوان تابعی از مقادیر دبی قطره‌چکان و نیز شعاع ناحیه غیراشباع در زمان‌های مختلف با استفاده از روابط و معادلات ارائه شده توسط شانی و همکاران (۱۹۸۷) به دست آید. روش مذکور برای برآورد توابع $K(h)$ و $\theta(h)$ بروکس-کوری (۱۹۶۴) به ترتیب توسط معادلات ۱ و ۲ و تابع $K(h)$ وودینگ (۱۹۶۸) از طریق معادله ۳ ارائه شده است. به علت تعدد معادلات از ذکر تمام آن‌ها در این تحقیق خودداری - گردید.

$$K(h) = K_s \left[\frac{h_e}{h} \right]^\mu ; \quad h \leq h_e \quad [1]$$

$$S_e = \left(\frac{h_e}{h} \right)^\beta , \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} ; \quad h \leq h_e \quad [2]$$

$$K(h) = K_s e^{\alpha h} \quad [3]$$

در این معادلات، K_s و $K(h)$ به ترتیب بیان‌گر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک ($L.T^{-1}$)، h_e پتانسیل ماتریک خاک (L)، h_e پتانسیل ماتریک خاک در نقطه ورود هوا (L)، S_e اشباع مؤثر (بدون بعد)، θ ، θ_s ، θ_r به ترتیب رطوبت حجمی خاک متناظر با پتانسیل ماتریک h ، رطوبت اشباع حجمی و رطوبت حجمی باقی‌مانده در خاک (L^3/L^3) هستند. μ و β با مقادیر مثبت (بدون بعد) و

رابطه خطی و غیرخطی در کمتر از یک دقیقه انجام دهد. بعد از اتمام محاسبات، معادلات را برحسب بالاترین ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین اصلاح شده (R_a^2) و کمترین خطای استاندارد (SE) رتبه بندی می کند. این قابلیت یکی از محسنات این نرم افزار است. منتهی نحوه انتخاب متغیرها و ترکیب آنها برای ایجاد توابع انتقالی در نرم افزار Data Fit به صورت گام به گام و خودکار نبوده و این ترکیب متغیرها بایستی تکتک وارد نرم افزار شده و برنامه اجرا گردد. بایستی به این نکته نیز توجه شود که در صورت وجود همبستگی درونی بین متغیرها، نرم افزار Data Fit متغیر را از معادلات حذف نمی کند. لذا در انتخاب متغیرها بایستی معادلاتی را که شامل متغیرهای دارای همبستگی درونی با هم هستند حذف کرد. به همین دلیل قبل از ورود متغیرها به نرم افزار ابتدا همبستگی بین آنها از طریق نرم افزار آماری SPSS تعیین شد. در صورت معنی دار شدن همبستگی بین متغیرهای ورودی، از وارد کردن همزمان آنها به نرم افزار Data Fit خودداری شد. مثلاً درصد شن با درصد سیلت و درصد رس همبستگی معنی دار داشت. در صورتی که درصد شن با نسبت سیلت به رس همبستگی نداشت. به همین دلیل در ایجاد توابع انتقالی، درصد شن با درصد سیلت یا درصد رس همزمان وارد نرم افزار Data Fit نشدند. متغیرهای ورودی در این مطالعه درصد شن، سیلت، رس، نسبت سیلت به رس، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی و هدایت الکتریکی عصاره اشباع می باشند. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که توزیع داده ها با استفاده از آزمون کولموگروف و اسمیرنوف توسط نرم افزار SPSS مورد بررسی گرفت. این آزمون توزیع تمام متغیرها را نرمال نشان داد.

تحلیل حساسیت^۱

اشباع تشکیل نمی شود) در هر خاک مشخص شد. چند دبی موجود در دامنه این دو دبی به عنوان دبی های مورد نظر در منطقه انتخاب شده و با تنظیم دستگاه در این دبی ها، آب به صورت قطره از ارتفاع ۱۰ سانتی متری روی سطح خاک ریزش کرد. قطر ناحیه اشباع نسبت به زمان تا رسیدن به مقداری ثابت اندازه گیری شد. بعد از حصول مقدار ثابت برای شعاع ناحیه اشباع، شعاع ناحیه غیر اشباع یعنی فاصله جبهه خیس شدگی از مرز ناحیه اشباع نیز در زمان های مختلف ثبت شد. در پایان هر آزمایش با تهیه نمونه خاک از ناحیه اشباع، رطوبت اشباع حجمی هم تعیین گردید. با قرار دادن مقادیر اندازه گیری شده در معادلات ارائه شده توسط شانی و همکاران (۱۹۸۷)، توابع منحنی رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع برای هر خاک به دست آمد.

برای اندازه گیری شاخه خیس شدن، تعداد روش محدود است. بررسی بسیاری از منابع مانند کری (۱۹۶۷)، گلوباس و نیوسپنا (۲۰۰۶) و دیویس و همکاران (۲۰۰۹) نشان می دهد هیچ یک از این روش ها منحنی رطوبتی شاخه خیس را به طور کامل در دامنه مکش صفر تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال تخمین نمی زنند مگر روش مزرعه ای شانی. درست است که در این روش برای محاسبه ضرایب، برخی معادلات تجربی به کار رفته است اما در استنتاج این روش از معادلات اثبات شده و معتبری چون فیلیپ نیز استفاده شده است. مسلماً هیچ روشی بدون خطا نیست، ولی با توجه به بررسی منابع عملی ترین و کم هزینه ترین روش برای این تحقیق، روش شانی انتخاب شد. لازم به ذکر است برای ارزیابی صحت روش قطره چکان، شانی و همکاران (۱۹۸۷) K_s و ضرایب معادله بروکس - کوری (۱۹۶۴) را با سه روش دیگر نیز اندازه گیری نموده و به نتایج مشابه با روش خود دست یافتند (شانی و همکاران ۱۹۸۷).

نرم افزار Data Fit

نرم افزار Data Fit (بی نام ۲۰۰۸) می تواند جایگزاری داده ها را به صورت خودکار در ۲۹۸ نوع

¹ Sensitivity analysis

$$RRMSE = \frac{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \right) \times 100}{O} \quad [5]$$

میانگین هندسی نسبت خطا ($GMER$) نشان‌دهنده میزان انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی است (معادله ۶). مقدار $GMER=1$ نشان از انطباق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی و مقادیر بزرگ‌تر و کوچک‌تر از یک به ترتیب نشان‌دهنده بیش برآوردی و کم برآوردی مقادیر تخمینی در مقایسه با اندازه‌گیری است. انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا ($GSDER$) معیاری از پخشیدگی داده‌ها است (معادله ۷). اگر برابر یک باشد نشان‌دهنده تطابق کامل و مقادیر بزرگ‌تر از یک نشان‌دهنده انحراف داده‌های تخمینی نسبت به اندازه‌گیری است. از لحاظ نظری $GMER$ و $GSDER$ برابر یک یعنی انطباق کامل بین مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری و فاصله گرفتن این دو معیار از یک به معنی افزایش خطای تخمینی است (تیت جی و هنینگز ۱۹۹۶).

$$GMER = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{S_i}{O_i} \right) \right] \quad [6]$$

$$GSDER = \exp \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{S_i}{O_i} \right) - \ln(GMER) \right]^2 \right]^{1/2} \quad [7]$$

در روابط مذکور، O و S به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت حجمی، O' میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رطوبت هست.

نتایج و بحث

دامنه تغییرات ویژگی‌های زودیاقت مورد استفاده در توسعه توابع انتقالی و ضریب همبستگی ساده خطی (پیرسون) بین این ویژگی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق پراکنش خوبی در هشت کلاس بافتی رس، رس سیلتی، لوم رسی، لوم رسی سیلتی، لوم سیلتی، لوم، لوم رسی شنی، لوم شنی داشتند (شکل ۲).

تحلیل حساسیت درجه حساسیت یک مدل ریاضی به متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد. این تحلیل مشخص می‌کند که کدام پارامتر ورودی بیشترین اثر را بر خروجی مدل خواهد داشت (عباسی ۱۳۸۶). در تعیین حساسیت به هر متغیر ابتدا سایر متغیرها برابر با میانگین آن‌ها ثابت در نظر گرفته شد و سپس میزان تغییرات خروجی با متغیر ورودی در دامنه میانگین \pm یک انحراف استاندارد تعیین گردید (بی‌نام ۲۰۰۵).

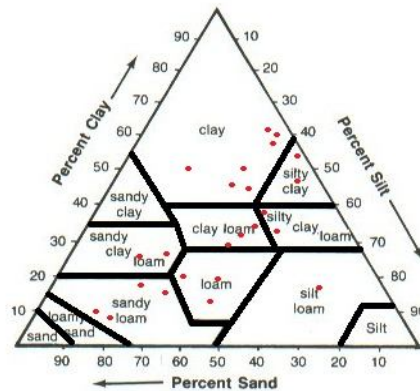
ارزیابی صحت توابع انتقالی

برای انتخاب تابع انتقالی که کمترین مقدار خطای تخمینی را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری دارد از چهار معیار آماری استفاده شد.

معیار d' شاخص مطابقت اصلاح شده است که از صفر تا یک هست (معادله ۴). هرچه مقدار d' به سمت یک میل کند نشان‌دهنده برابری مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده هست و خطای تخمینی به صفر میل می‌کند (سالازار و همکاران ۲۰۰۸).

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O'| + |O_i - O'|)} \quad [4]$$

$RRMSE$ جذر میانگین مربعات خطا نسبت به میانگین بی بعد بوده و از صفر تا مقادیر مثبت بزرگ متغیر است (معادله ۵). در بهترین تطابق مقدار $RRMSE$ برابر صفر بوده و افزایش آن بیانگر افزایش انحراف مقادیر تخمینی از مقادیر اندازه‌گیری شده است (مانیام و همکاران ۲۰۰۷). ارجحیت $RRMSE$ نسبت به $RMSE$ (جذر میانگین مربعات خطا) این است که اولی بدون بعد بوده و خطای انحراف را به صورت درصدی از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. درحالی‌که دومی دارای واحد بوده و مقدار آن بسته به محدوده متغیر است.



شکل ۲- پراکنش کلاس‌های بافت بین خاک‌های مورد مطالعه.

جدول ۱- شاخص‌های آماری محاسبه شده برای ویژگی‌های زودیافت مورد استفاده در ایجاد توابع انتقالی.

	S	Si	C	Si/C	d_g	σ_g	D_b	OM	EC_e
Min	۳/۲۹	۱۶/۵۶	۱۳/۴۸	۰/۳۴	۰/۰۰۴	۶/۳۸	۱/۲۷	۰/۳۴	۰/۵۵
Mean	۲۷/۷۱	۳۶/۱۴	۳۶/۱۱	۱/۲۵	۰/۰۳۹	۱۲/۶۷	۱/۴۴	۱/۵۴	۴/۶۸
Max	۶۱/۰۸	۶۴/۷۹	۶۲/۸۶	۳/۶۸	۰/۱۳۹	۲۲/۵۷	۱/۵۹	۳/۹۲	۶۶/۸۰
S.D.	۱۸/۶۷	۱۰/۵۸	۱۰/۰۵	۰/۸۲	۰/۰۴۱	۴/۰۵	۰/۰۷	۰/۹۸	۱۳/۱۴
Correlation									
S(%)	۱								
Si(%)	-۰/۵۴۵**	۱							
C(%)	-۰/۸۲۳**	-۰/۰۲۸	۱						
Si/C	۰/۲۶۵	۰/۵۹۴**	-۰/۷۱۹**	۱					
d_g (mm)	-۰/۹۳۶**	-۰/۴۴۶*	-۰/۸۱۵**	-۰/۳۳۳	۱				
σ_g	-۰/۸۳۸**	-۰/۶۹۴**	-۰/۴۰۸*	-۰/۱۵	-۰/۴۷۷*	۱			
ρ_b ($cm^3 cm^{-3}$)	-۰/۶۵۸**	-۰/۰۶۵	-۰/۷۴۲**	-۰/۴۲۵*	-۰/۶۷۱**	-۰/۲۸۸	۱		
OM(%)	-۰/۰۶۹	۰/۳۹	-۰/۰۵۹	-۰/۱۱۶	-۰/۱۲۳	-۰/۰۹۲	-۰/۲۱۷	۱	
EC_e ($dS m^{-1}$)	-۰/۱۱۲	-۰/۵۲۵**	-۰/۲۲۲	-۰/۵۹۶**	-۰/۰۸۷	-۰/۱۷۷	-۰/۰۳۵	-۰/۰۹۱	۱

S: درصد شن، Si: درصد سیلت، C: درصد رس، d_g : میانگین هندسی قطر ذرات، σ_g : انحراف معیار هندسی قطر ذرات، ρ_b : جرم مخصوص ظاهری، OM: درصد ماده آلی و EC_e : هدایت الکتریکی عصاره اشباع.

پارامترهای مدل بروکس- کوری را نشان می‌دهد. در این جدول مشاهده می‌شود که برخی پارامترها مانند θ_s با اغلب متغیرها همبستگی بالا دارد. در صورتی که برخی پارامترها با متغیرها همبستگی معنی‌داری ندارند. اما نکته قابل توجه در این میان این است که θ_s بیشترین همبستگی را با متغیرهایی نشان داده است که بعداً در توابع انتقالی نیز آمده است. همچنین در ایجاد توابعی مثل θ_{rd} با وجود اینکه بیشترین همبستگی متعلق به C و d_g هست ولی به علت همبستگی درونی این دو متغیر با هم، متغیر دیگری جایگزین C در معادله شد.

تمامی متغیرها دامنه تغییرات بالایی دارند و این موضوع نشان‌دهنده این است که توابع ایجاد شده در تعداد خاک‌های بیشتر و متنوع کاربرد خواهند داشت (آنگارو و همکاران ۲۰۰۵). همچنین همبستگی بالا و معنی‌داری بین بیشتر ویژگی‌های خاک وجود دارد که برای ایجاد توابع انتقالی ضروری است. بررسی این همبستگی‌ها به فهم روابط موجود بین ویژگی‌های خاک کمک کرده و در یافتن راه‌هایی برای بهبود دقت و قابلیت اعتماد PTF ها مؤثر خواهد بود (بیات ۱۳۸۷). جدول ۲ همبستگی ساده (r) بین متغیرهای زودیافت و

جدول ۲- همبستگی بین متغیرهای زودیافت و پارامترهای بروکس- کوری.

S	Si	C	Si/C	d _g	σ _g	D _b	OM	EC _e	پارامتر
۰/۱۸۵	۰/۲۰۶	-۰/۲۸۸	-۰/۰۲۲	۰/۲۴۹	۰/۰۱۳	۰/۱۷۳	-۰/۱۸۳	/۲۱۸	β _w (-)
۰/۰۷۰	۰/۱۰۵	-۰/۰۱۰	۰/۲۳۹	۰/۱۳۷	۰/۳۹۴	۰/۳۱۳	-۰/۱۳۱	/۴۲۵*	β _d (-)
۰/۰۰۶	۰/۰۹۶	۰/۰۷۰	-۰/۰۱۷	۰/۲۳۰	۰/۰۴۲	-۰/۱۳۵	-۰/۱۷۳	/۲۳۱	h _{ew} (cm)
۰/۰۴۶	۰/۲۶۶	۰/۱۲۵	۰/۱۹۳	-۰/۰۹۹	۰/۰۸۱	۰/۲۴۵	-۰/۴۵۷*	/۱۷۲	h _{ed} (cm)
-۰/۱۲۹	۰/۱۳۹	۰/۲۳۸	-۰/۳۲۰	-۰/۰۸۳	۰/۰۴۷	-۰/۱۳۷	-۰/۳۰۵	/۱۹۸	θ _{rw} (cm ³ cm ⁻³)
-۰/۴۵۴*	۰/۱۴۶	-۰/۳۶۰	-۰/۳۹۳	-۰/۵۳۷**	۰/۲۳۷	-۰/۱۹۸	-۰/۵۵۳**	/۲۶۶	θ _{rd} (cm ³ cm ⁻³)
-۰/۵۵۱**	۰/۱۸۳	۰/۵۲۸**	۰/۱۶۹	-۰/۵۶۰**	۰/۳۱۸	-۰/۷۲۱**	۰/۵۷۱**	/۰۴۱	θ _{sw} (cm ³ cm ⁻³)
-۰/۵۴۴**	۰/۱۵۱	۰/۵۴۱**	۰/۲۰۴	-۰/۵۵۳**	۰/۳۰۹	-۰/۷۴۷**	۰/۵۵۷**	/۰۶۶	θ _{sd} (cm ³ cm ⁻³)

پارامترهای مدل بروکس- کوری (θ_r, θ_s, β و h_e) برای شاخه خشک شدن از طریق واردکردن داده‌های رطوبت و مکش حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به برنامه RETC محاسبه شدند. ویژگی‌های آماری ضرایب محاسبه شده شاخه‌ی خشک شدن در جدول ۳ ارائه شده است. پارامترهای شاخه خیس شدن مدل بروکس- کوری به‌روش مزرعه‌ای شانی (شانی و همکاران ۱۹۸۷) محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- شاخص‌های آماری برای پارامترهای مدل بروکس- کوری (شاخه خشک شدن).

ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	بیشینه	میانگین	کمینه	پارامتر
۸/۳۷۰	۰/۰۴۴	۰/۵۶۶	۰/۴۹۹	۰/۴۱۵	$\theta_s(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$
۴۱/۵۷۰	۰/۰۵۸	۰/۲۲۳	۰/۱۴۰	۰/۰۰۱	$\theta_r(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$
۴۷/۹۳۰	۱۴/۹۶۷	۵۸/۴۷۰	۳۱/۲۲۸	۱۰/۶۹۵	$h_c(\text{cm})$
۳۰/۹۱۰	۰/۱۱۸	۰/۶۴۵	۰/۳۸۲	۰/۱۷۳	$\beta(-)$

جدول ۴- شاخص‌های آماری برای پارامترهای مدل بروکس- کوری (شاخه خیس شدن).

ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	بیشینه	میانگین	کمینه	پارامتر
۸/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۵۴۷	۰/۴۹۴	۰/۴۱۴	$\theta_s(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$
۵۰/۸۰۰	۰/۰۳۰	۰/۱۶۴	۰/۰۵۹	۰/۰۲۴	$\theta_r(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$
۷۰/۷۵۰	۸/۱۶۰	۴۷/۰۱۲	۱۱/۵۳۳	۵/۴۰۰	$h_c(\text{cm})$
۲۵/۰۶۰	۰/۰۶۳	۰/۴۰۰	۰/۲۵۰	۰/۱۵۸	$\beta(-)$

به‌منظور ایجاد توابع انتقالی در قالب معادلات رگرسیونی برای تخمین پارامترهای دو شاخه خشک و خیس شدن مدل بروکس- کوری (۱۹۶۴) ویژگی‌های

زود یافت به‌عنوان متغیر مستقل و پارامترهای اندازه-گیری شده برای هر دو شاخه به‌طور جداگانه به‌عنوان متغیر وابسته وارد برنامه Data Fit شدند. خروجی برنامه انواع معادلات رگرسیونی به‌همراه ضرایب R^2 و SE بود. معادلات رگرسیونی خطی ارائه شده توسط نرم‌افزار R^2 های بسیار پایین داشتند. آزمون همبستگی نیز عدم معنی‌داری R ها را با توجه به درجات آزادی و از روی جداول مربوطه (استیل و توری ۱۹۸۰) نشان داد. توابع انتقالی ایجاد شده در قالب معادلات رگرسیونی غیرخطی برای تخمین پارامترهای هر دو شاخه خشک و خیس شدن در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود تمام توابع از نوع معادلات رگرسیونی غیرخطی چندگانه با توان بیشینه پنج (برای برخی از ویژگی‌ها) و با R^2 هایی در محدوده ۰/۸۰ تا ۰/۹۰ می‌باشند. آزمون معنی‌دار بودن R ها (برابر $\sqrt{R^2}$) با توجه به درجات آزادی و از روی جداول مربوطه (استیل و توری ۱۹۸۰) انجام شد. این مقادیر نشان‌دهنده همبستگی بالا بین ویژگی‌های زود یافت وارد شده به معادلات و پارامترهای مدل

مطابق جدول ۳ و ۴ پارامترهای دو شاخه خشک و خیس شدن در مدل بروکس- کوری با هم متفاوت است. دامنه تغییرات پارامتر β بین ۰/۱۵۸ تا ۰/۴ با میانگین ۰/۲۴۹ در شاخه خیس شدن و بین ۰/۱۷۳ تا ۰/۶۴۵ با میانگین ۰/۳۸۲ در شاخه خشک شدن بوده و نشان‌دهنده بزرگ‌تر بودن دامنه تغییرات و میانگین این پارامتر برای شاخه خشک شدن در مقایسه با شاخه خیس شدن است. این روند یعنی بزرگ‌تر بودن مقادیر پارامترها در شاخه خشک شدن نسبت به شاخه خیس شدن در تمام پارامترها اتفاق افتاده است. توماسلا و همکاران (۲۰۰۳) عنوان کرده‌اند که در طی فرآیند خشک و خیس شدن، ویژگی‌های متفاوتی در خاک، دامنه خشک و خیس منحنی رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. البته مکانیسم‌های مختلفی در وقوع پدیده پس‌ماند (کوزه‌ای شکل بودن منافذ، تغییر زاویه تماس و حبس هوا) دخیل می‌باشند که تحلیل بیشتر نیاز به پی بردن نقش متغیرها در این مکانیسم‌ها است. اما اطلاعات موجود این امکان را نمی‌دهد و شاید برای پی بردن به این موضوع نیاز به برخی اندازه‌گیری‌ها مثل شکل منافذ، تغییر زاویه تماس و چگونگی حبس هوا باشد.

توابع انتقالی ایجاد شده

BC (چه در شاخه خشک شدن و چه در شاخه خیس شدن) بوده و از بین این دو متغیر نیز OM بیشترین نقش را با حضور در ۶ معادله ایفا کرد. بر اساس تحلیل حساسیت، اهمیت نسبی متغیرهای موجود در هر تابع انتقالی به دست آمد. مقادیر مطلق حاصل از این تحلیل در جدول ۶ آمده است. نتایج تحلیل نشان داد که پارامترهای β_w و θ_{rw} نسبت به متغیر رس، پارامترهای β_d ، h_{ed} و θ_{sw} نسبت به جرم مخصوص ظاهری و پارامترهای h_{ew} ، θ_{rd} و θ_{sd} نسبت به ماده آلی حساسیت بیشتری دارند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد حساسیت پارامترهای متناظر شاخه‌های خشک و خیس شدن (خروجی مدل) نسبت به متغیرها متفاوت است. برای مثال حساسیت پارامتر β_w به متغیر رس و حساسیت پارامتر β_d به تغییر جرم مخصوص ظاهری بیشتر از بقیه متغیرها است. اهمیت و حساسیت ویژگی‌های ظاهر شده در تخمین پارامترهای بروکس-کوری نشان داد که متغیرهای ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری و سپس متغیر رس به‌عنوان ویژگی‌های غالب در شکل‌گیری شاخه خشک و خیس شدن منحنی رطوبتی و نیز رفتار پس‌ماند نقش اساسی دارند. البته تأثیر متغیر رس فقط در شاخه خیس شدن دیده شد. طبیعی است که تأثیر ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری بر توزیع اندازه منافذ، این دو ویژگی را در زمره عوامل کنترل‌کننده هر دو شاخه منحنی رطوبتی قرار داده است. در تحقیقات راولز و همکاران (۱۹۸۲) و وستن و همکاران (۱۹۹۹) نیز میزان ماده آلی به‌طور موفقیت‌آمیزی به‌عنوان متغیر ورودی بکار رفت.

بروکس-کوری هست. در ایجاد توابع برای تخمین پارامترهای مدل BC عمدتاً دو متغیر به‌عنوان ورودی در معادلات بکار رفته است (به‌عنوان مثال در برآورد θ_{rw} ، درصد رس و ماده آلی دو متغیر ورودی‌اند) و جملات بعدی توان یا ترکیبی از دو متغیر هستند. دلیل این امر آن است که در ایجاد توابع چند هدف باهم مدنظر بوده‌اند. عدم وجود همبستگی درونی بین متغیرهای وارد شده به معادلات، حفظ R^2 بالا، وجود ارتباط فیزیکی منطقی و قابل تفسیر بین ویژگی‌های زودیافت و پارامترها و در نهایت انتخاب معادلات با تعداد متغیرهای کمتر به‌منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسبات، مجموعه عواملی بودند که در انتخاب توابع تأثیرگذار بوده‌اند.

نکته قابل‌تأمل در توابع ایجاد شده، مشابه نبودن متغیرهای مستقل در تخمین پارامترهای متناظر دو شاخه خشک و خیس شدن است. بخصوص در توابع ایجاد شده β_w و β_d ، متغیرهای مستقل وارد شده در هر دو تابع مشابه نیستند. این موضوع نشان می‌دهد که ویژگی‌های متفاوتی در خاک شاخه خشک و خیس شدن منحنی رطوبتی و به‌تبع از آن پارامترهای دو شاخه مذکور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌همین دلیل برای هر کدام از پارامترهای هیدرولیکی مربوط به شاخه‌های خشک و خیس شدن، توابع انتقالی متفاوتی به دست آمد. رتبه تعدد حضور هر کدام از متغیرهای ورودی در توابع به‌ترتیب زیر است:

$$OM > D_b > C = d_g > EC_e = \sigma_g$$

این ترتیب نشان می‌دهد که دو متغیر OM و D_b بیشترین متغیرهای ورودی در تخمین پارامترهای مدل

جدول ۵- توابع انتقالی ایجاد شده برای برآورد پارامترهای شاخه خشک و خیس شدن مدل بروکس- کوری (۱۹۶۴).

شماره معادله	R ²	توابع انتقالی
۸	۰/۸۴	$\beta_w = -3.23696 + 567.55718 / C - 34654.56516 / C^2 + 959889.27 / C^3 - 12213341.53 / C^4 + 57887066.53 / C^5$ $+ 0.61795 / EC_c - 1.40455 / EC_c^2 + 2.06508 / EC_c^3 - 1.57138 / EC_c^4 + 0.42334 / EC_c^5$
۹	۰/۸۰	$\beta_d = 518.67409 - 144.79562 \ln(\sigma_g) - 1695.60116 / D_b + 14.92203 \ln(\sigma_g)^2 + 1837.359 / D_b^2 + 312.20004 \ln(\sigma_g) / D_b$ $- 1.12979(\sigma_g)^3 - 629.0146 / D_b^3 - 191.97196 \ln(\sigma_g) / D_b^2 - 9.31984 \ln(\sigma_g)^2 / D_b$
۱۰	۰/۹۰	$h_{sw} = 11.81482 - 4.01609 \times 10^{-2} / d_g - 15.83257 \ln(OM) - 2.82816 \times 10^{-4} / d_g^2 + 0.93681 \ln(OM)^2 + 0.36011 \ln(OM) / d_g$ $+ 4.25497 \times 10^{-6} / d_g^3 + 8.84437 \ln(OM)^3 - 0.18381 \ln(OM)^2 / d_g - 1.50499 \times 10^{-3} \ln(OM) / d_g^2$
۱۱	۰/۸۰	$h_{ed} = -11772316.50 + 41158143.178 D_b - 57472341.568 D_b^2 + 40066908.176 D_b^3 - 13945821.914 D_b^4$ $+ 1938795.756 D_b^5 + 419.29817 OM - 580.72438 OM^2 + 326.65880 OM^3 - 79.96747 OM^4 + 7.05954 OM^5$
۱۲	۰/۸۶	$\theta_{rw} = -116.41290 + 160.71809 \ln(C) - 87.85539 \ln(C)^2 + 23.73251 \ln(C)^3 - 3.16379 \ln(C)^4 + 0.16627 \ln(C)^5$ $+ 0.37524 / OM - 0.55389 / OM^2 + 0.30253 / OM^3 - 4.02548 \times 10^{-2} / OM^4 - 4.15667 \times 10^{-3} / OM^5$
۱۳	۰/۸۲	$\theta_{rd} = -4.13386 - 6.36415 \ln(d_g) - 3.57069 \ln(d_g)^2 - 0.93659 \ln(d_g)^3 - 0.11462 \ln(d_g)^4 - 5.23669 \ln(d_g)^5$ $- 4.2124 \ln(OM) - 0.25781 \ln(OM)^2 + 0.34335 \ln(OM)^3 + 0.25736 \ln(OM)^4 - 0.26818 \ln(OM)^5$
۱۴	۰/۸۵	$\theta_{sw} = 3005.878 - 20685.048 D_b + 56751.597 / D_b^2 - 77587.298 / D_b^3 + 52858.959 / D_b^4 - 14357.085 / D_b^5 - 0.47936 / OM$ $+ 0.77861 / OM^2 - 0.63214 / OM^3 + 0.24744 / OM^4 - 3.56661 \times 10^{-2} / OM^5$
۱۵	۰/۸۵	$\theta_{sd} = 3708.0129 - 12508.39 D_b + 16824.97 D_b^2 - 11277.122 D_b^3 + 3766.266 D_b^4 - 501.38675 D_b^5 - 0.64566 / OM$ $+ 1.01558 / OM^2 - 0.78476 / OM^3 + 0.29099 / OM^4 - 4.00158 \times 10^{-2} / OM^5$

انزیر نویس‌های θ و w به ترتیب نشان دهنده شاخه خشک و خیس شدن منفی رطوبتی هستند.

جدول ۶- مقادیر مطلق حاصل از نتایج تحلیل حساسیت در تعیین مؤثرترین متغیر

در تخمین پارامترهای مدل بروکس-کوری.

مقادیر مطلق	متغیر ورودی	پارامتر
۰/۰۲۰۲	C	$\beta_w(-)$
۰/۰۰۱۵	EC	-----
۰/۰۰۶۹	σ_g	$\beta_d(-)$
۰/۰۲۷۱	D_b	-----
۰/۰۰۰۴	d_g	$h_{ew}(cm)$
۰/۰۱۲۸	OM	-----
۰/۰۹۶۴	D_b	$h_{ed}(cm)$
۰/۰۰۴۸	OM	-----
۰/۰۱۳۵	C	$\theta_{rw}(cm^3/cm^3)$
۰/۰۰۳۰	OM	-----
۰/۰۰۲۰	d_g	$\theta_{rd}(cm^3/cm^3)$
۰/۰۰۲۸	OM	-----
۰/۰۱۰۱	D_b	$\theta_{sw}(cm^3/cm^3)$
۰/۰۰۱۰	OM	-----
۰/۰۰۷۳	D_b	$\theta_{sd}(cm^3/cm^3)$
۰/۰۰۹۶	OM	-----

قطر ذرات، رطوبت باقی مانده نیز افزایش می‌یابد که این خود مربوط به اثر سطح ویژه خاک بر مقدار رطوبت باقیمانده هست (خالق پناه و همکاران ۱۳۹۱). اثر OM نیز همان‌طور که قبلاً اشاره گردید می‌تواند با افزایش تخلخل و سطح ویژه منجر به تمایل خاک در نگهداری آب در مکش‌های مختلف گردد (راولز و همکاران ۲۰۰۳).

از نکات قابل ذکر دیگر حضور EC_e در معادله β_w بود. حضور EC_e در معادلات، احتمالاً تأثیر شوری را روی ویژگی‌های هیدرولیکی به واسطه تأثیر املاح بر اندازه منافذ و توزیع آن‌ها نشان می‌دهد (لیما و همکاران ۱۹۹۰). تیت‌جی و تاپکن هینریش (۱۹۹۳) پیشنهاد کردند که اگر داده‌های ژنتیکی خاک (مانند نوع رس، pH و EC) علاوه بر متغیرهایی که به‌طور مرسوم به‌عنوان تخمین‌گر پارامترها استفاده می‌شوند وارد معادلات شوند تخمین PTF دقیق‌تر خواهد بود (بیات ۱۳۸۷).

با توجه به جدول ۷، نتایج حاصل از مقایسه درستی تخمین توابع برای پارامترهای هر دو شاخه خشک و خیس شدن در مدل بروکس-کوری یعنی d' و RRMSE

نکته قابل توجه دیگر در توابع ایجادشده، ترکیب متغیرهای OM و D_b در تخمین پارامتر θ_s (چه در شاخه خشک شدن و چه در شاخه خیس شدن) هست. پارامتر مذکور چون شامل آب ثقلی، آب کاپیلاری و آب هیگروسکوپیک است لذا به‌تمامی عوامل موجود در خاک نظیر بافت، جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی که بر توزیع اندازه منافذ و سطح ویژه تأثیر می‌گذارند بستگی دارد (جانا و همکاران ۲۰۰۷). بررسی‌های زاکاریاس و وسولک (۲۰۰۷) نشان داد که D_b مهم‌ترین پارامتر در تخمین θ_s در مدل ون‌گنوختن بود. در صورتی که شارما و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر معنی‌دار OC در تخمین θ_s مدل ذکرشده را گزارش کردند (بیات ۱۳۸۷).

ترکیب متغیرهای C و OM در تخمین پارامتر θ_r شاخه خشک شدن مدل BC نشان داد که با دور شدن از شرایط اشباع و نزدیک شدن به رطوبت‌های پایین در خاک، رطوبت نگهداری شده به مقدار منافذ بسیار ریز و سطح ویژه ذرات خاک بستگی دارد. در واقع با افزایش مقدار رس یا به عبارتی دیگر با کاهش میانگین هندسی

نشان داد که تخمین بهتری از پارامترهای β ، h_e و θ_s مربوط به شاخه خیس شدن در مقایسه با شاخه خشک شدن به دست آمد. همچنین تابع θ_{rd} در این مدل خطای تخمین کمتری نسبت به θ_{rw} داشت.

جدول ۷- تعداد و نوع متغیرهای وارد شده و ملاکهای آماری درستی تخمین توابع ایجاد شده در برآورد پارامترهای مدل بروکس-کوری (شاخه‌ی خشک و خیس شدن).

پارامتر مدل	شماره معادله	متغیر ورودی	d'	RRMSE	GMER	GSDER
β_w	۸	Clay, EC_e	۰/۷۹۶	۱۰/۱۵۸	۱/۰۰۶	۱/۱۱۲
β_d	۹	σ_g, D_b	۰/۷۷۷	۱۳/۸۲۸	۰/۰۱۷	۱/۰۱۶
h_{ew}	۱۰	d_g, OM	۰/۸۵۷	۱۴/۵۶۹	۱/۰۱۸	۱/۲۹۴
h_{ed}	۱۱	D_b, OM	۰/۷۹۲	۲۱/۵۳۳	۰/۹۷۶	۱/۲۷۵
θ_{rw}	۱۲	Clay, OM	۰/۷۹۳	۱۸/۷۹۵	۱/۰۲۹	۱/۲۱۲
θ_{rd}	۱۳	d_g, OM	۰/۸۲۰	۱۷/۴۹۵	۱/۰۵۳	۱/۲۷۹
θ_{sw}	۱۴	D_b, OM	۰/۸۶۱	۳/۱۱۷	۰/۹۹۶	۱/۰۳۶
θ_{sd}	۱۵	D_b, OM	۰/۸۱۴	۳/۵۸۰	۱/۰۰۵	۱/۰۳۷

بر داده‌های تجربی تحقیق جاری) در پایگاه‌های اطلاعاتی قابل‌دسترس برای ارزیابی توابع انتقالی ایجاد شده با به‌کارگیری داده‌های مستقل میسر نشد.

نتیجه‌گیری کلی

توابع انتقالی برای برآورد پارامترهای دو شاخه خشک و خیس مدل بروکس-کوری از ویژگی‌های خاک، از نوع معادلات رگرسیونی غیرخطی چندگانه با R^2 های بالا در محدوده ۰/۸۰ تا ۰/۹۰ ایجاد شدند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای β_w و θ_{rw} نسبت به متغیر رس، پارامترهای β_d ، h_{ed} و θ_{sw} نسبت به جرم مخصوص ظاهری و پارامترهای h_{ew} ، θ_{rd} و θ_{sd} نسبت به ماده آلی حساسیت بیشتری دارند. این نتایج نشان داد که متغیرهای ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری و سپس متغیر رس به‌عنوان ویژگی‌های غالب در شکل‌گیری شاخه خشک و خیس شدن منحنی رطوبتی و نیز رفتار پس‌ماند نقش اساسی دارند. مکانیسم‌های مختلفی در وقوع پدیده پس‌ماند (کوزه‌ای شکل بودن منافذ، تغییر زاویه تماس و حبس هوا) دخیل می‌باشند که تحلیل بیشتر نیاز به پی بردن نقش متغیرها در این مکانیسم‌ها هست. اما اطلاعات موجود این امکان را نمی‌دهد و شاید برای پی بردن به این موضوع نیاز به برخی اندازه‌گیری‌ها مثل شکل منافذ، تغییر زاویه تماس

معیار RRMSE تنها بر مقدار خطای تخمین و میانگین متغیر اندازه‌گیری شده بستگی دارد اما معیار d' علاوه بر خطای تخمین به واریانس داده‌های تجربی و تخمینی نیز بستگی دارد. لذا به‌کارگیری d' و سپس RRMSE برای مقایسه صحت تخمین متغیر بین دو شاخه خشک و خیس بیشتر مورد استناد قرار گرفت.

معادله ۱۴ بهترین تابع ایجاد شده برای برآورد θ_{sw} مدل بروکس-کوری (بیشترین مقدار d'، کمترین مقدار RRMSE و مقادیر GMER و GSDER بسیار نزدیک به یک) بود. به‌طور کلی صحت برآورد پارامترهای شاخه خشک و خیس شدن در مدل بروکس کوری با توجه به معیارهای آماری رضایت‌بخش و خوب است.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که در بیشتر پایگاه داده‌های خاک، اطلاعات مربوط به شاخه خیس شدن وجود ندارد و بیشتر اطلاعات مربوط به شاخه خشک شدن منحنی رطوبتی است. در پایگاه داده UNSODA اطلاعات مربوط به شاخه خیس شدن برای معدودی از خاک‌ها و آن‌هم در محدوده مکش (۱۰۰-۰ سانتی‌متر آب) ارائه شده است. علاوه بر این برای برخی از خاک‌ها نیز داده‌های درج شده دارای خطا و احتمالاً اشتباه است به طوری که گاه رطوبت‌های گزارش شده در مکش‌های پائین (نزدیک اشباع) کمتر از مکش‌های بزرگ‌تر هستند. به همین دلیل امکان دستیابی به داده‌های مستقل (علاوه

این موضوع که چرا ویژگی‌های متفاوت خاک در شکل‌گیری پارامتر دو شاخه خیس و خشک شدن دخالت دارند شایان توجه و تحقیق بیشتری است.

و چگونگی حبس هوا باشد. بر اساس اطلاعات موجود و بررسی منابع، تابع انتقالی برای برآورد پارامترهای شاخه خیس شدن منحنی رطوبتی (غیر از تحقیق جاری) از ویژگی‌های زود یافت گزارش نشده است. لذا بررسی

منابع مورد استفاده

بیات ح، ۱۳۸۷. ایجاد توابع انتقالی برای پیش‌بینی منحنی رطوبتی از طریق شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) و مدیریت گروهی داده‌ها (GMDH) با استفاده از پارامترهای فراکتالی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی. رساله دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.

خالق پناه ن، شرفا م و تیموری س، ۱۳۹۱. تخمین منحنی رطوبتی تعدادی از خاک‌های شور و شور و سدیمی با استفاده از توابع انتقالی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک). جلد ۲۶، شماره ۴، صفحه‌های ۳۹۱ تا ۴۰۲.

نوالفقاری عا، شرفا م، محمدی مح، لیاقت عم، هورفر ع و گرجی م، ۱۳۹۲. یک روش تحلیلی جدید برای برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در ستون خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع غذایی)، جلد ۲۷، شماره ۱، صفحه‌های ۱۴۵ تا ۱۵۷.

رضوی س، رسول زاده ع و نیشابوری مر، ۱۳۸۹. ارزیابی توابع انتقالی در شبیه‌سازی شاخه جذبی منحنی مشخصه آب خاک. صفحه‌های ۱ تا ۱۱. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب. دانشگاه تبریز، تبریز.

عباسی ف، ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.

Ahuja LR, Naney JW and Williams RD, 1984. Scaling to characterize soil water properties and infiltration modeling. *Soil Science Society of America Journal* 48: 970-973.

Anonymous, 2005. Getting Started Manual Version 4. NeuroDimension, Inc. 1900 N. Main Street, unit D4 Gainesville, FL Nørgaard M, 2000. Neural Network Based System Identification Toolbox. Tech. Rep. 00-E-891, Dep. Of Automation, Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, Denmark.

Anonymous, 2008. Data Fit. Version 9.0.59. Oakdale Engineering. Oakdale, Pennsylvania, USA.

Arya LM and Paris JF, 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristics from particle size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal* 45: 1023-1030.

Bloemen GW, 1980. Calculating hydraulic conductivities from texture and organic matter content. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 143: 581-605.

Brooks RH and Corey AT, 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology papers*, Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA.

Cary JW 1967. Experimental measurements of soil-moisture hysteresis and entrapped air. *Soil Science* 104:174-180.

Dane JH and Hopmans JW, 2002. Water retention and storage. Pp. 671-795. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Method of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

Davis DD, Horton R, Heitman JL and Ren T, 2009. Wettability and hysteresis effects on water sorption in relatively dry soil. *Soil Science Society of America Journal* 6: 1947-1951.

Flint AL and Flint LE, 2002. Particle density. Pp. 229-240. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Method of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

Gee GW and Or D, 2002. Particle size analysis. Pp. 255-294. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Method of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

Globus AM and Neusypina TA, 2006. Determination of the water hysteresis and specific surface of soils by electronic microhygrometry and psychrometry. *Eurasian Soil Science* 39: 270-277.

Grossman RB and Reinesch TG, 2002. Bulk Density and Linear Extensibility. Pp. 201-228. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Method of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

- Islam N, Wallender WW, Mitchell JP, Wicks S and Howitt RE, 2006. Performance evaluation of methods for the estimation of soil hydraulic parameters and their suitability in a hydrologic model. *Geoderma* 134: 135-151.
- Jana RB, Mohanty BP and Springer EP, 2007. Multi scale pedotransfer functions for soil water retention. *Vodose Zone Journal* 6: 868-878.
- Klute A, 1986. Water Retention: Laboratory Methods. Pp. 687-734. In: Klute A (ed). *Method of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Lima LA, Grismer ME and Nielsen DR, 1990. Salinity effect on Yolo loam hydraulic properties. *Soil Science* 150: 451-458.
- Manyame C, Morgan CL, Heilman JL, Fatondji D, Gerard B and Payne WA, 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma* 141: 407-415.
- Maqsood A, Bussi re B, Mbonimpa M and Aubertin M, 2004. Hysteresis effects on the water retention curve: A comparison between laboratory results and predictive models. Pp. 8-15. *Proceedings of the 57th geotechnical conference*, Canada.
- Minasny B, McBratney AB and Bristow KL, 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma* 93: 225-253.
- Nelson DW and Sommers LE, 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp. 961-1010. In: Sparks DL (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Nemes A and Rawls WJ, 2006. Evaluation of different representations of the particle size distribution to predict soil water retention. *Geoderma* 132: 47-58.
- Rawls WJ and Brakensiek DL and Saxton KE 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of American Society of the Agricultural Engineers(ASAE)* 108: 1316-1320.
- Rawls WJ, Pachepsky YaA, Ritchie JC, Sobecki TM and Bloodworth H, 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116: 61-76.
- Salazar O, Westrom I and Joel A, 2008. Evaluation of drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management* 95: 1135-1143.
- Scheinost AC, Sinowski W and uerswald K, 1997. Regionalization of soil water retention curves in highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78:129-143.
- Shani U, Hanks RJ, Bresler E and Oliveira CAS, 1987. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. *Soil Science Society of America Journal* 51: 298-302.
- Sharma SK, Mohanty BP and Zhu J, 2006. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1430-1440.
- Shirazi MA and Boersma L, 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal* 48: 142-147.
- Steel RGD and Torrie JH, 1980. *Principles and Procedures of Statistics*. McGraw-Hill Book Company, NewYork,USA.
- Tietje O and Hennings V, 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69: 71-84.
- Tietje O and Topkenhinrichs M, 1993. Evaluation of pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1088-1095.
- Tomasella J, Pachepsky YaA, Crestana S and Rawls WJ, 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1085-1092.
- Ungaro F, Calzolari C and Busoni E, 2005. Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy: water retention properties. *Geoderma* 124: 293-317.
- van Genuchten MTh, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- Wooding RA, 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research* 4: 1259-1273.
- Wosten JHM, Lilly A, Nemes A and Le Bas C, 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169-185.

- Wosten JHM, Pachepsky YaA and Rawls WJ, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251: 123-150.
- Zacharias S and Wessolek G, 2007. Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. *Soil Science Society of America Journal* 71: 43-50.