ارزیابی توانایی توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک (مطالعه موردی: شهرستان بویین زهرا)

علی گنجی آزادپور[1]، علی رسول زاده[2*] و جوانشیر عزیزی مبصر[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲*- نویسنده مسئول،دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

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

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۲۶

چکیده

منحنی مشخصه آبِ خاک در بسیاری از مطالعات از جمله شبیه‌سازی حرکت آب و املاح و مسایل مربوط به آبیاری و زهکشی مورد نیاز می‌باشد. این ویژگی هیدرولیکی خاک به روش مستقیم(صحرایی و آزمایشگاهی) و غیر مستقیم تعیین می گردد. روش‌های مستقیم پر هزینه و زمان‌بر بوده و لذا از روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی، برای برآورد این ویژگی آبِ خاک استفاده می‌شود. توابع انتقالی به منظور برآورد شاخه واجذب منحنی مشخصه آبِ خاک توسعه یافته‌است در حالی که کمتر پژوهشی در مورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک انجام شده است. در این پژوهش از روش صحرایی شانی برای به دست آوردن شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک در کاربری‌های کشاورزی، در ۳۹ نقطه از شهرستان بویین زهرا استفاده شد. ابتدا ۱۰ تابع انتقالی پارامتریک ملی و بین‌المللی برای برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد منحنی مشخصه آبِ خاک شبیه سازی شده با توابع انتقالی، تطابق مناسبی با شاخه‌ی جذبی منحنی مشخصه‌ی آبِ خاک اندازه‌گیری شده ندارند. با توجه به عملکرد نامناسب توابع انتقالی، به منظور برآورد بهتر شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رابطه رگرسیونی غیرخطی ایجاد گردید. نتایج نشان داد استفاده از معادله های رگرسیونی استخراج شده سبب می گردد ریشه میانگین مربعات خطا توابع انتقالی مایر و جارویس(۱۹۹۹)، وستن و همکاران(۱۹۹۹) ، کمپل(۱۹۸۵) و سکستون و همکاران(۱۹۸٦) به ترتیب ۱۷٤، ۱٤۰، ۱۳۲ و ۱۱۳ درصد، کاهش یافته و در نتیجه باعث بهبود برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک گردد. همچنین نتایج نشان داد استفاده از معادله های رگرسیونی استخراجی در این پژوهش، سبب می گردد که مقادیر نسبت خطای متوسط هندسی به یک نزدیک‌تر شده و در نتیجه از مقادیر بیش برآوردها و کم برآوردها در توابع انتقالی مختلف کاسته شود.

کلید واژه ها: منحنی رطوبتی، توابع انتقالی، شاخه جذب منحنی آبِ خاک، بویین زهرا.

Evaluating The Ability of Parametric Pedotransfer Functions for Estimating The Wetting Branch of The Soil Water Retention Curve (Case study: Boinzahra)

A. Ganji Azad Por[1], A. Rasoulzadeh[2*] and J. Azizi Mobser[3]

1- Graduate Student, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2*- Associate Professor., Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3- Assistant Professor., Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received:3 May 2015 Accepted:18 October 2015

Abstract

Soil water retention curve in many studies, including simulating the movement of water and solutes, irrigation and drainage issues is required. This soil hydraulic property was determined by direct (field and laboratory) and indirect methods. Direct methods are costly and time consuming

therefore the indirect method such as pedotransfer functions (PTFs) are the alternative to estimate this property. PTFs are developed to estimate drying branch of soil water retention curve whereas little research has been done for wetting branch of soil water retention curve. In this study, Shani field method was used to obtain wetting branch of soil water retention curve in agricultural area in 39 site of Boinzahra county. At the first, 10 national and international parametric PTFs were evaluated to estimate wetting branch of soil water retention curve. Results showed that simulated soil water retention curve using PTFs were not consistent with the measured soil water retention curve. In order to improve simulation of wetting branch of soil water retention curve, non-linear regression is used between simulated and measured value. The results showed that the using derived non-linear regression causes the Root Mean Square Error (RMSE) of PTFs of Mayr-Jarvis (1999), Wosten et al. (1999), Campbell (1985), and saxton et al. (1986) decreases 174, 140, 132, and 113 percent, respectively and consequently improves estimation of wetting branch of soil water retention curve. The results also showed that the using derived non-linear regression causes Geometric mean Error Ratio (GMER) closes to one and prevents over and under estimation of PTFs.

Keywords: Retention curve, Pedotransfer functions, Wetting branch of soil water retention curve, Boinzahra.

مقدمه

منحنی به دست آمده از ارتباط بین پتانسیل ماتریک و رطوبت موجود در خاک را منحنی مشخصه آبِ خاک می‌نامند. اولین بار منحنی مشخصه آبِ خاک توسط چایلدز ارایه شد. سپس با ساخت دستگاه صفحات فشاری توسط ریچاردز به تدریج منحنی مشخصه شکل امروزی خود را پیدا کرد (باومگارتنر و همکاران[1]،۱۹۹۴). منحنی مشخصه آب خاک در بسیاری از مدل‌سازی‌ها و بررسی‌های مسایل آب و خاک از جمله حرکت آب و املاح، هیدرولوژی و آبیاری و زهکشی ضروری می‌باشد. روش‌های مستقیم متعددی برای به دست آوردن این منحنی وجود دارد، اما با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن آن‌ها و نیز تغییرات نقطه‌ای خصوصیات هیدرولیکی، استفاده از روش‌های غیرمستقیم به منظور برآورد آن راه حل جایگزین مناسبی می‌باشد. بنابراین با استفاده از توابع انتقالی به عنوان روش غیرمستقیم می‌توان از اطلاعات زودیافت خاک از قبیل درصد شن، سیلت، رس، چگالی ظاهری و ماده آلی به اطلاعات دیر یافت خاک مانند منحنی مشخصه آبِ خاک دست پیدا کرد. توابع نقطه‌ای مقدار رطوبت را در پتانسیلی مشخص برآورد می‌کنند که عموماً دو نقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دایم می‌باشد در حالی که توابع پارامتریک، عوامل یک مدل مانند مدل‌های کمپل[2] (۱۹۷۴) و ون‌گنوختن[3] (۱۹۸۰) را برآورد می‌کند که با استفاده از آن‌ها می‌توان رطوبت در هر مکش دلخواه را به دست آورد. هر خاک با توجه به عواملی مانند پدیده پسماند رطوبتی دارای دو منحنی مشخصه آبِ خاک می‌باشد که عبارتند از شاخه واجذب یا خشک شدن و شاخه جذب یا تر شدن. برای مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک وجود شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک الزامی می‌باشد. با این وجود، به علت سهولت، بیشتر شاخه واجذب در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود و لذا توابع انتقالی ایجاد شده براساس داده‌های شاخه واجذب می‌باشد. بیچیگرسی و همکاران[4] (۲۰۰۹) شش تابع انتقالی را با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد توابع انتقالی راولز و وریکن در نقطه ظرفیت مزرعه و توابع انتقالی راولز و براکنسیک و راولز در نقطه پژمردگی عملکرد مناسب دارند و تابع انتقالی دی جونگ و همکاران ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. گیوی و همکاران[5] (۲۰۰۴) با بررسی توابع انتقالی مختلف نشان دادند توابع انتقالی سازمان خاکشناسی بریتانیا[6] و براکنسیک بهترین عملکرد را در برآورد نقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دارند و بدترین عملکرد مربوط به تابع انتقالی مایر و جارویس[7] (۱۹۹۹) می‌باشد. تیجی و هنینگس[8] (۱۹۹۶) با بررسی توابع انتقالی متعدد با مقادیر اندازه‌گیری شده به منظور برآورد نقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دایم گزارش کردند تابع وریکن عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد و تابع انتقالی راولز و براکنسیک نسبت به دیگر توابع مورد بررسی عملکرد مناسب‌تری دارد. کرنلیس و همکاران[9] (۲۰۰۱) با بررسی توابع انتقالی مختلف نشان دادند تابع وریکن برآورد نسبتاً دقیقی از منحنی مشخصه آبِ خاک دارد و تابع راولز و همکاران به ویژه در قسمت مرطوب منحنی مشخصه آبِ خاک عملکرد ضعیفی دارد. ترابی و

1- Baumgartner *et al.*
2 -Campbell
3- van Genuchten

4 -Buccigrossi *et al.*
5 - Givi *et al.*
6 -British Soil Survey
7 - Mayr and Jarvis
8 -Tietje and Hennings
9 -Cornelis *et al.*

قهرمان(۱۳۸۶) چند تابع انتقالی متداول داخلی و خارجی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد دو مدل قربانی و همایی نسبت به مدل‌های خارجی عملکرد بهتری برای برآورد منحنی مشخصه آبِ خاک دارند و در بین مدل‌های خارجی وستن[1] (۱۹۹۷) و وریکن و همکارن[2] (۱۹۸۹) عملکرد بهتری داشتند. حق وردی و همکاران (۱۳۹۱) با اعتبارسنجی و مقایسه چند تابع پارامتریک و نقطه‌ای گزارش کردند در بین توابع نقطه‌ای به منظور برآورد رطوبت خاک در نقطه‌های ظرفیت مزرعه و پژمردگی دایم تابع سازمان خاکشناسی بریتانیا خاک سطحی و تابع انتقالی هاتسون به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشته و در بین توابع پارامتریک برای برآورد منحنی مشخصه آبِ خاک تابع کمپل (۱۹۸۵) و وریکن و همکاران (۱۹۸۹) به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشتند. فولادمند و هادی پور (۱۳۹۰) با بررسی توابع مختلف داخلی و خارجی برای برآورد منحنی مشخصه آبِ خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده گزارش کردند تابع انتقالی وستن و همکاران (۱۹۹۹) بهترین عملکرد را داشته و نسبت به توابع انتقالی داخلی ارجحیت دارد. در بیشتر تحقیقات انجام شده شاخه واجذب منحنی مشخصه آبِ خاک مورد ارزیابی قرار گرفته و همان طور که یاد شد توابع انتقالی نیز از همین شاخه به دست آمده است. رسول زاده و همکاران (۱۳۹۱) توابع انتقالی متعددی را با شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار دادند، ایشان گزارش کردند هیچ یک از توابع انتقالی توانایی برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک را نداشته و تنها تابع مایر و جارویس (۱۹۹۹) تا حدی نسبت به دیگر توابع عملکرد بهتری داشته است. همان طور که مشاهده می‌شود در مناطق مختلف نتایج متفاوتی برای توابع انتقالی گزارش شده است که نشان می‌دهد در هر منطقه پیش از استفاده از توابع انتقالی ابتدا باید توابع مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته، سپس در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر آن پژوهش‌های اندکی برای بررسی توانایی تابع انتقالی در برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک انجام شده است. لذا هدف از این پژوهش، نخست ارزیابی توابع انتقالی مختلف برای برآورد شاخه جذب می‌باشد. سپس ایجاد رابطه رگرسیونی غیرخطی بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده توسط توابع انتقالی مختلف، به منظور برآورد بهتر شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش دارای کاربری کشاورزی بوده و در شهرستان بویین زهرا واقع در استان قزوین قرار گرفته است. تعداد ۳۹ نمونه خاک دست خورده و دست نخورده از دشت‌های این منطقه به صورت تصادفی از عمق ۱۰- ۰ سانتی متری تهیه گردید. جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) با روش خشک کردن نمونه‌ی خاک دست نخورده در آون اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه‌ی ذرات (شامل درصد-های شن، سیلت و رس)، محتوای مواد آلی و جرم مخصوص حقیقی (ρ_s) بر روی نمونه‌های دست خورده به ترتیب با روش‌های هیدرومتری قرائت چهار زمانه، والکلی بلک[3]و پیکنومتر به‌دست آمدند (دنی و تاپ[4] ، ۲۰۰۲؛ نلسون و سومرس[5] ، ۱۹۸۲) هر پارامتر در سه تکرار در آزمایشگاه اندازه‌گیری و میانگین آنها در توابع انتقالی مورد استفاده قرار گرفت. تخلخل کل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. رطوبت اشباع حجمی خاک برابر با تخلخل کل در نظر گرفته شد.

$$n = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \qquad (۱)$$

اندازه‌گیری شاخه جذب منحنی مشخصه

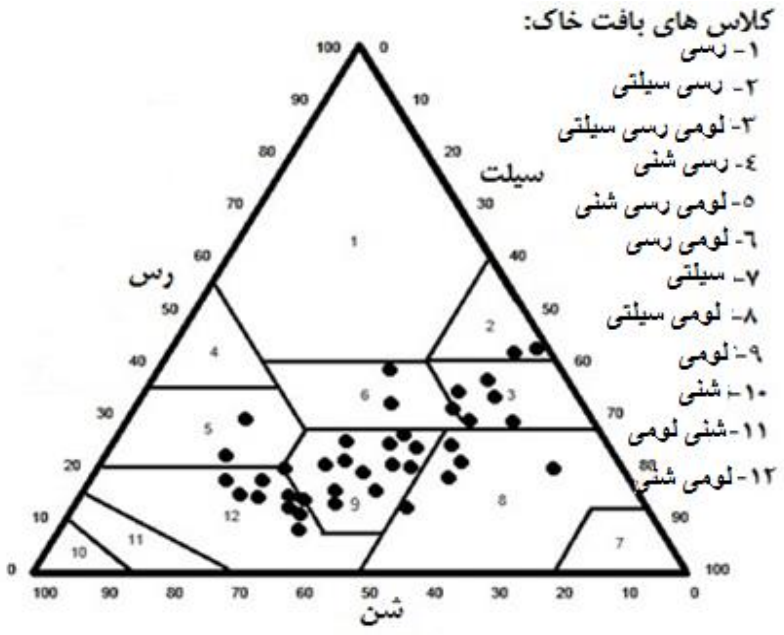
برای به‌دست آوردن شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک در این پژوهش از روش صحرایی شانی که در اصطلاح به آن روش قطره چکان نیز گفته می‌شود استفاده شد (شانی[6] و همکاران، ۱۹۸۷). از روش شانی می‌توان برای به دست آوردن منحنی‌های مشخصه آبِ خاک و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع استفاده کرد (شانی و همکاران، ۱۹۸۷). در ۳۹ نقطه از منطقه بدون تغییر در شرایط طبیعی زمین و در وضع موجود آزمایش صحرایی شانی انجام شد و با استفاده از روابط این روش شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک به دست آمد. جزئیات این روش در مقاله شانی (شانی و همکاران، ۱۹۸۷) ذکر شده است و به علت تعدد معادله ها از ذکر آن اجتناب می‌گردد.

توابع انتقالی پارامتریک

در این پژوهش هفت تابع پارامتریک خارجی و سه تابع پارامتریک داخلی مورد ارزیابی قرار گرفت که برای برآورد مدل‌های مختلف ون‌گنوختن (۱۹۸۰)، کمپل (۱۹۷۴)، بروکز-کوری[7] (۱۹۶۴)، گاردنر و هاتسون-کاس (۱۹۸۷) بروکز -کوری اصلاح شده (به نقل از گیوی و همکاران، ۲۰۰۴) می‌باشد. با استفاده از توابع انتقالی، پارامترهای مدل‌های یاد شده به دست آمد. توابع انتقالی پارامتریک مورد تحقیق در جدول (۱) ارایه شده است. در توابع انتقالی وستن و همکاران (۱۹۹۹) و وستن (۱۹۹۷) مقدار θ_r برابر صفر فرض شده است . شایان ذکر است با توجه به تعدد بسیار بالای معادله‌ها از ارایه آن‌ها اجتناب شده و نام توابع به همراه ورودی و خروجی آن‌ها ذکر شده است.

1 - WÖsten
2 - Vereecken *et al.*

3- Walkley- Black
4-Dane and Topp
5-Nelson and Sommers
6 - Shani *et al.*
7 - Brooks and corey



شکل۱- موقعیت نمونه خاک‌های استفاده شده در این پژوهش بر روی مثلث بافت خاک

در جدول فوق، OC: درصد مقدار کربن آلی، Si: درصد سیلت، C: درصد رس، BD: چگالی ظاهری(گرم بر سانتی متر مکعب)، OM: درصد ماده آلی، θ_p: رطوبت در نقطه عطف منحنی، dg و δg: به ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات، h, θ_r و λ: ضرایب معادله بروکز و کوری، α،n، m و θ_r: ضرایب معادله ون گنوختن، a',b': ضرایب معادله گاردنر، a,b: ضرایب معادله کمپل، a,b (modified) : ضرایب معادله هاتسون کاس، θ_S: رطوبت حجمی اشباع و SSC: درصد شن، سیلت و رس می‌باشد.

نرم افزار سویل پار نسخه۲

آکوتیس و دوناتلی[1] (۲۰۰۳) نرم افزار سویل‌پار[2] نسخه۲ را که شامل توابع انتقالی رگرسیونی است به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک طراحی کردند. نرم افزار سویل پار برای تخمین پارامترهای مدل‌های منحنی مشخصه آبِ خاک بروکز – کوری، ون گنوختن، هاتسون کاس و کمپل[3] (۱۹۸۷) به ترتیب از توابع انتقالی راولز و براکنسیک (۱۹۸۹)، وریکن و همکاران (۱۹۸۹)، مایر و جارویس (۱۹۹۹) و کمپل (۱۹۷۴) استفاده می‌کند.

شاخص‌های آماری

به منظور ارزیابی منحنی مشخصه آبِ خاک برآورد شده به وسیله توابع انتقالی پارامتریک، شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا[4] (RMSE) و نسبت خطای متوسط هندسی[5] (GMER) به ترتیب با استفاده از روابط (۲) تا (۴) محاسبه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2} \qquad (۲)$$

$$\varepsilon = \frac{O_i}{S_i} \qquad (۳)$$

$$GMER = EXP\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ln(\varepsilon_i)\right) \qquad (۴)$$

که در آن ε نسبت خطا، S و O: به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک و N: تعداد مشاهدات می‌باشد. اگر مقدار نسبت خطای متوسط هندسی برابر یک باشد، نشان دهنده تطبیق کامل مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشد. مقدار نسبت خطای متوسط هندسی بیشتر از یک نشان دهنده بیش برآورد و کمتر از یک نشان دهنده کم برآورد می‌باشد.

1- Acutis and Donatelli
2- SOILPAR
3 - Hutson and Cass
4- Root Mean Square Error
5- Geometric mean Error Ratio

نتایج و بحث

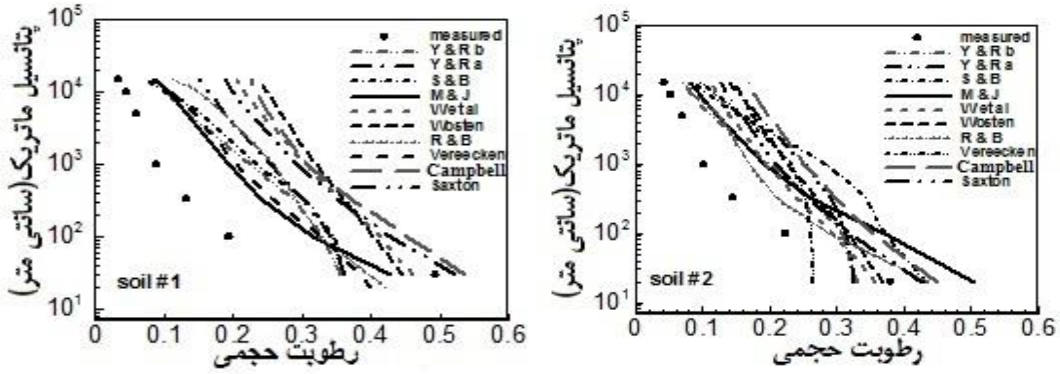
میانگین، حداقل و حداکثر خصوصیات فیزیکی زود یافت ۳۹ نمونه خاک مورد مطالعه در جدول (۲) ارایه شده است. جدول (۲) نشان می دهد خاک‌های استفاده شده دامنه وسیعی از بافت را در بر دارد به طوری که مقدار شن از ۱/۱ تا ۶۱/۷ درصد، مقدار سیلت از ۱۷/۹ تا ۷۰/۰ درصد و رس از ۸/۲ تا ۴۲/۶ درصد تغییر می‌کند. برای نمایش پراکندگی نمونه‌ها در این پژوهش موقعیت نمونه‌ها در مثلث بافت خاک نمایش داده شده است(شکل۱). شکل(۱) نشان می دهد تنوع بافتی در منطقه مورد پژوهش زیاد بوده به طوری که بافت خاک منطقه، شامل هفت کلاس از ۱۲ کلاس بافت خاک بود.

جدول۱- توابع انتقالی پارامتریک بررسی شده

تابع انتقالی	ورودی	خروجی
راولز و براکنسیک[1] (۱۹۸۹)	Si,C,BD	λ, h, θ_r
سپاسخواه و بندار[2] (۲۰۰۲)	SSC,BD,O M,Θ_p	θ_r, hp,m,α
سکستون و همکاران[3] (۱۹۸۶)	Sa,C	a',b'
کمپل(۱۹۸۵)	SSC,BD	a,b
مایر و جارویس (۱۹۹۹)	SSC,BD,OC	a, b (modified)
وریکن و همکاران (۱۹۸۹)	SSC,BD	m, n, α, θ_r
وستن (۱۹۹۷)	C,BD,OM	n,α
وستن و همکاران (۱۹۹۹)	Si,C,BD,OM	n,α
نوع اول یعقوبی و رسول زاده (۱۳۸۸)	SSC,BD	n,α,θ_r,θ_s
نوع دوم یعقوبی و رسول زاده (۱۳۸۸)	dg, δg ,BD	n,α, θ_r, θ_s

جدول۲- تعداد، میانگین،حداقل، حداکثر و انحراف معیار ویژگی‌های نمونه خاک‌های مورد پژوهش

متغیر	تعداد	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
چگالی ظاهری(گرم بر سانتی متر مکعب)	۳۹	۱/۴	۱/۱	۱/۶	۰/۱
شن(درصد)	۳۹	۳۶/۲	۱/۱	۶۱/۸	۱۷/۰
سیلت(درصد)	۳۹	۴۱/۴	۱۷/۹	۷۰/۰	۱۱/۸
رس(درصد)	۳۹	۲۲/۳	۸/۲	۴۲/۶	۸/۷



شکل۲- منحنی مشخصه آبِ خاک برآورد شده به وسیله توابع انتقالی مختلف مورد پژوهش

(توابع نوع اول و دوم یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱) به ترتیب با Y & R a و Y & R b ، تابع انتقالی مایر و جارویس(۱۹۹۹) با M & R، تابع انتقالی وستن و همکاران (۱۹۹۹) با W et al و تابع انتقالی سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲) با S & B نشان داده شده است)

1 - Rawls and Brakensiek
2 - Sepaskhah and Bondar
3 - Saxton *et al.*

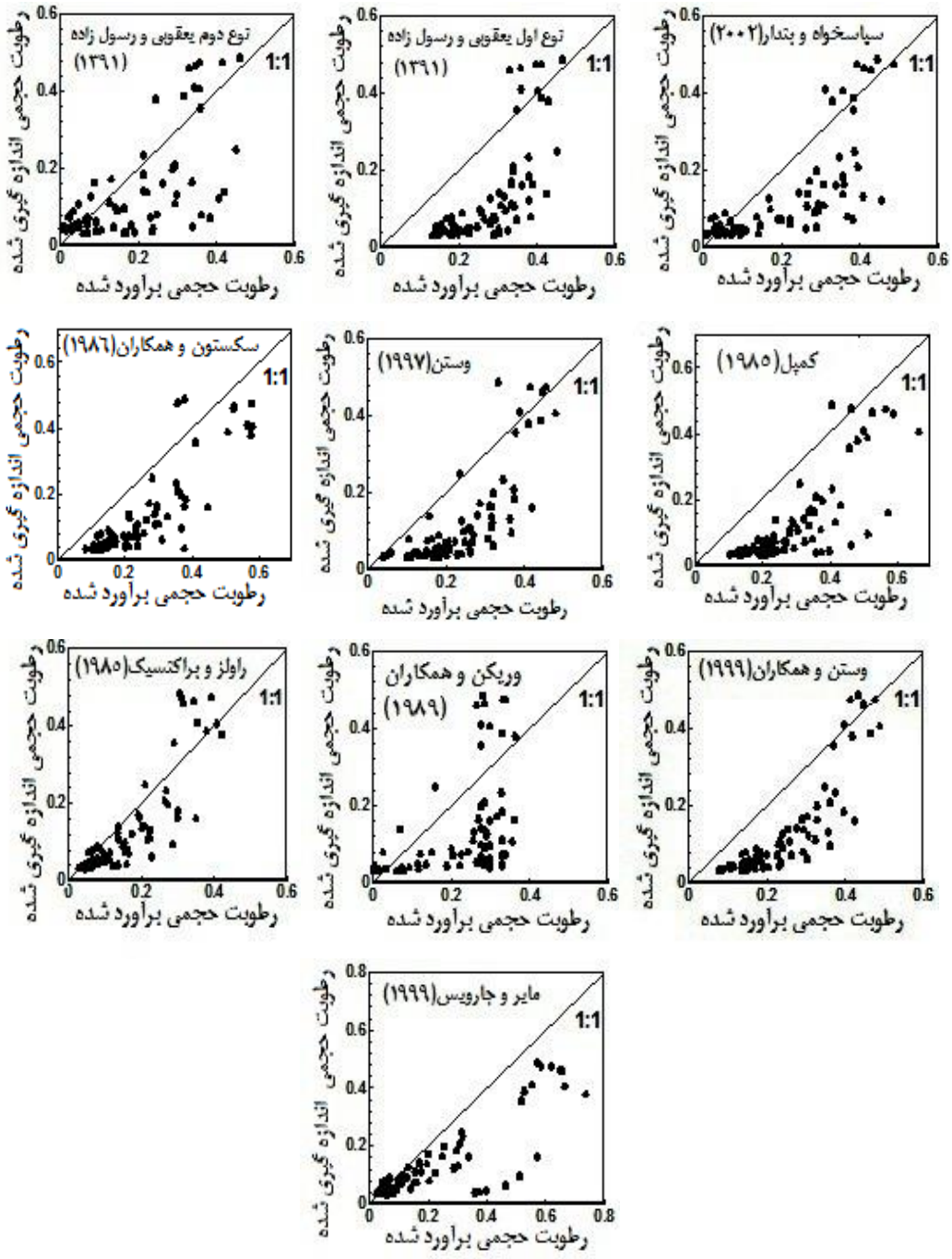
جدول۳- روابط رگرسیون غیر خطی استخراجی برای توابع انتقالی پارامتریک

تابع	تابع رگرسیونی غیرخطی استخراجی	ضریب تبیین
راولز و براکنسیک (۱۹۸۹)	θ_o= -237.58323×θ_s^5+250.90263×θ_s^4-91.98119×$\theta_s^3$16.32578×θ_s^2-0.78189×θ_s+0.06108	0.71
سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲)	θ_o=30.43964×θ_s^5-67.96856×θ_s^4+47.29101× θ_s^3-11.00715×θ_s^2+1.10250×θ_s+0.02223	0.70
سکستون و همکاران (۱۹۸۶)	θ_o= -64.56490× θ_s^5+99.49188× θ_s^4-60.31700× θ_s^3+19.33760× θ_s^2-2.49578×θ_s+0.15295	0.74
کمپل(۱۹۸۵)	θ_o= 50.13682×θ_s^5-111.24300×θ_s^4+88.91734× θ_s^3-30.2503×θ_s^2+4.86649×θ_s-0.24999	0.70
مایر و جارویس(۱۹۹۹)	θ_o= 17.31941×θ_s^5-33.83130×θ_s^4+20.59172×θ_s^3-4.11395×θ_s^2+0.82300×θ_s+0.02293	0.87
وریکن و همکاران (۱۹۸۹)	θ_o= 1824.09046×θ_s^5-1523.01955×θ_s^4+452.75501×θ_s^3-55.54643×θ_s^2+2.86265×θ_s+0.00462	0.35
وستن (۱۹۹۷)	θ_o= 56.10357×θ_s^5-120.18919×θ_s^4+86.26903×θ_s^3-23.62800×θ_s^2+2.88949×θ_s-0.08004	0.74
وستن و همکاران (۱۹۹۹)	θ_o= 20.32685×θ_s^5-59.97470×θ_s^4+49.36194×θ_s^3-13.90980×θ_s^2+1.86028×θ_s-0.04168	0.76
نوع اول یعقوبی و رسول زاده(۱۳۹۱)	θ_o= 2213.51460×θ_s^5-3091.47104×θ_s^4+1667.28224×θ_s^3-427.13406×θ_s^2+52.08277×θ_s-2.37661	0.64
نوع دوم یعقوبی و رسول زاده(۱۳۹۱)	θ_o= 217.31480×θ_s^5-274.04300×θ_s^4+121.55390×θ_s^3-20.06580×θ_s^2+1.33360×θ_s+0.03928	0.60

نتایج نشان داد اکثر توابع انتقالی قادر به برآورد مناسبی از شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک نمی‌باشند. شکل (۲) منحنی مشخصه آبِ خاک برآورد شده توسط توابع انتقالی رگرسیونی مورد پژوهش، به همراه منحنی مشخصه آبِ خاک شاخه جذب اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. شایان ذکر است به علت تعدد نمونه‌ها، از ارایه همه شکل‌ها اجتناب شده و فقط دو نمونه در شکل (۲) ارایه شده است. بقیه نمونه‌ها نتایج مشابهی را ارایه کردند. شکل (۲) نشان می‌دهد توابع انتقالی به دست آمده از شاخه واجذب، برآورد مناسبی از منحنی مشخصه آبِ خاک شاخه جذب ندارد. این نتیجه با نتایج رسول‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) همسو بود. با توجه به اینکه توابع انتقالی قادر به برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک نشد لذا برای ارتقاء برآورد توابع انتقالی، رابطه رگرسیونی غیرخطی بین رطوبت‌های برآورد شده با توابع انتقالی با رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های متناظر منحنی مشخصه آبِ خاک(شاخه جذب) برقرار شد. به طوری که معادله های رگرسیونی ایجاد شده، سبب می‌گردد اختلاف رطوبت برآورد شده، با توابع انتقالی در هر مکش با رطوبت اندازه‌گیری شده کاهش یابد. به عبارت دیگر با به کارگیری معادله های رگرسیونی ایجاد شده در این پژوهش، منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده با توابع انتقالی با شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده، تطابق بهتری پیدا کند. بنابراین از ۳۹ شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک به دست آمده از روش صحرایی شانی ۲۹ منحنی مشخصه آبِ خاک به صورت تصادفی انتخاب شد و بین این منحنی‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده به وسیله توابع انتقالی مختلف رابطه‌های رگرسیونی غیرخطی مختلف با استفاده از نرم افزار دیتافیت[1] برقرار گردید. از بین رابطه‌های رگرسیونی ایجاد شد، رابطه‌ای که دارای بالاترین ضریب تبیین (R^2) بود انتخاب گردید. بهترین روابط به منظور برآورد بهتر شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک برای هر تابع پارامتریک در جدول (۳) ارایه داده شده است. بیشترین ضریب تبیین برای مدل مایر و جارویس (۱۹۹۹) و کمترین ضریب تبیین برای مدل وریکن و همکاران (۱۹۸۹) به دست آمد (جدول ۳) که نشان‌دهنده عدم برازش مناسب معادله رگرسیونی ایجاد شده در این پژوهش برای این مدل می باشد. جدول (۳) نشان می دهد دامنه تغییرات ضریب تبیین ، بین ۰/۶۰ تا ۰/۸۷ بوده که با توجه به ماهیت توابع انتقالی، به نظر می‌رسد در حد قابل قبول باشد. با این وجود، اعتبار معادله های رگرسیونی ایجاد شده مورد سنجش قرار گرفت. برای این منظور، ۱۰ نمونه باقیمانده از ۳۹ نمونه، برای صحت سنجی روابط رگرسیونی ایجاد شده، استفاده گردید. ابتدا منحنی مشخصه آبِ خاک برای ۱۰ نمونه با استفاده از توابع انتقالی پارامتریک مختلف برآورد شد و

1 - DATAFIT

رطوبت‌های برآورد شده به وسیله توابع انتقالی پارامتریک در برابر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در مکش‌های متناظر رسم گردید (شکل ۳). سپس برای صحت سنجی معادله های رگرسیونی اشتقاق یافته (جدول۳)، رطوبت‌های برآورد شده به وسیله این معادله های، تعدیل شده در برابر رطوبت‌های اندازه‌گیری رسم گردید (شکل۴).



شکل۳- رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در برابر رطوبت‌های برآورد شده به وسیله توابع انتقالی پارامتریک در مکش‌های متناظر برای شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک

جدول٤- نتایج مقادیر شاخص‌های آماری برای توابع پارامتریک بدون استفاده از معادله های رگرسیونی استخراجی در این پژوهش

تابع پارامتریک	ریشه میانگین مربعات خطا(سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب)	نسبت خطای متوسط هندسی
راولز و براکنسیک (۱۹۸۹)	۰/۰۷۵	۱/۴۲۳
سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲)	۰/۱۲۶	۱/۶۱۲
سکستون و همکاران (۱۹۸۶)	۰/۱۴۲	۲/۴۹۲
کمپل (۱۹۸۵)	۰/۱۹۲	۳/۰۳۷
مایر و جارویس (۱۹۹۹)	۰/۰۹۴	۱/۳۹۲
وریکن و همکاران (۱۹۸۹)	۰/۱۶۶	۱/۹۳۰
وستن (۱۹۹۷)	۰/۱۴۳	۲/۴۷۷
وستن و همکاران (۱۹۹۹)	۰/۱۳۱	۲/۴۱۰
نوع اول یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱)	۰/۱۷۴	۲/۹۱۵
نوع دوم یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱)	۰/۱۱۸	۱/۲۸۴

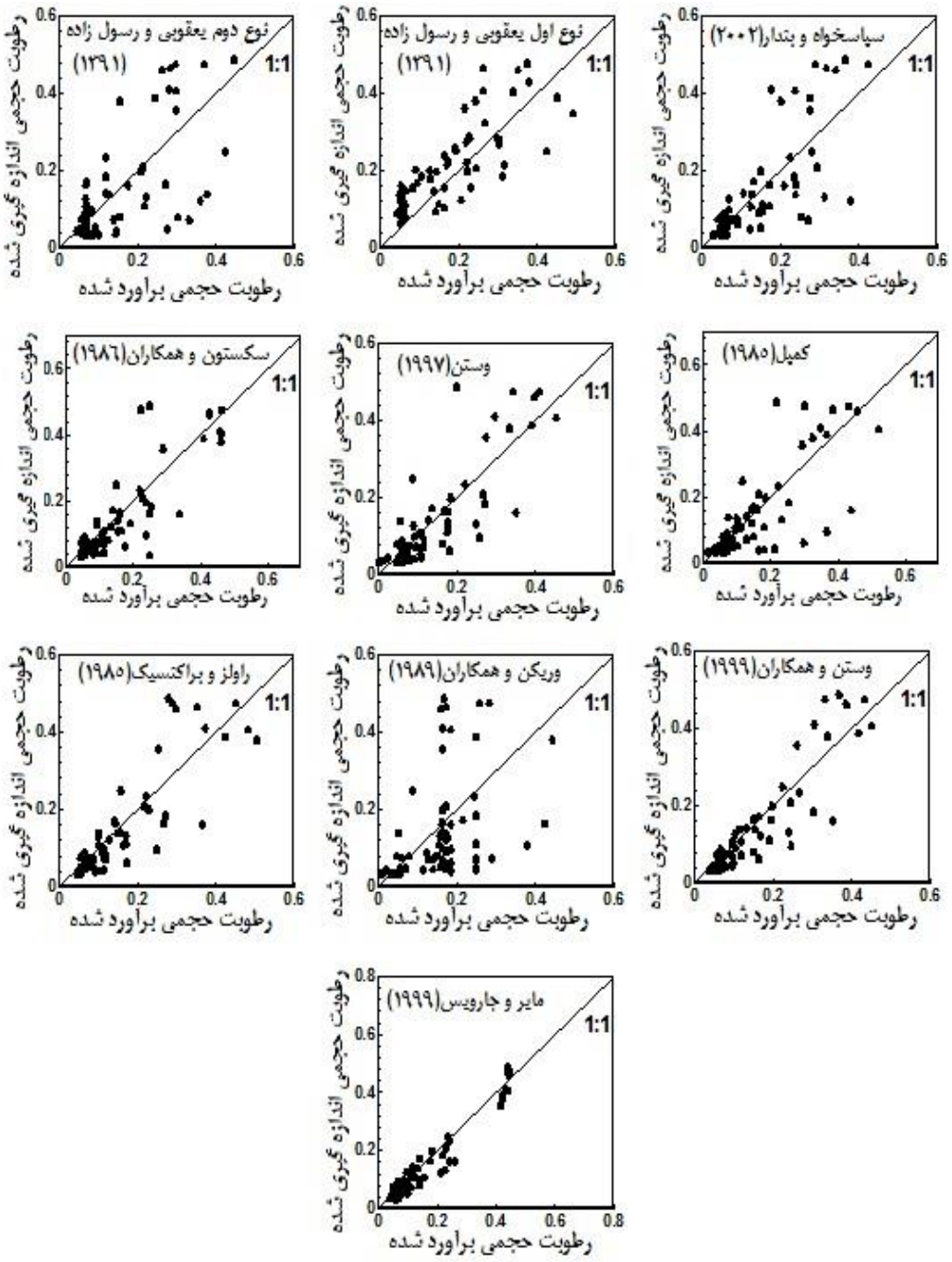
در جدول فوق θ_s: رطوبت برآورد شده با توابع انتقالی و θ_o: رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در مکش‌های متناظر شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک می‌باشد. نتایج نشان داد در مجموع همه توابع انتقالی بیش برآورد[1] صورت گرفته است که توابع انتقالی کمپل (۱۹۸۵)، نوع اول یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱)، وستن (۱۹۹۷)، وستن و همکاران (۱۹۹۹) و سکستون و همکاران (۱۹۸۶) نسبت به دیگر توابع انتقالی بیشتر ، بیش برآورد انجام داده‌اند (شکل۳).

توابع انتقالی کمپل (۱۹۸۵) و سکستون و همکاران (۱۹۸۶) (به جز دو نقطه) در همه نقاط بیش برآورد و در دیگر توابع انتقالی در برخی نقاط کم برآورد صورت گرفته است و برای دیگر توابع انتقالی اگرچه در بیشتر نقاط بیش برآورد شده است اما در برخی نقاط کم برآورد اتفاق افتاده است که برای توابع انتقالی نوع دوم یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱) و وریکن و همکارن (۱۹۸۹) تعداد نقاط کم برآورد بیشتر می‌باشد در واقع در این توابع انتقالی پراکندگی اطراف خط یک به یک بیشتر می‌باشد (شکل۳) و در برخی نقاط بیش برآورد و در برخی نقاط کم برآورد را نشان می‌دهد. شکل (۳) نشان می‌دهد تابع انتقالی مایر و جارویس (۱۹۹۹) در مکش‌های بالا (رطوبت‌های کم) با فاصله بسیار کمی اطراف خط یک به یک پراکنده می‌باشد در واقع درمکش‌های بالابرآورد مناسبی داشته است و در رطوبت‌های بیشتر از ۲۰ درصد مقدار بیش برآوردها افزایش داشته است. همان‌طور که اشاره گردید برای بهبود شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده به وسیله توابع انتقالی برای ۱۰ خاک از توابع رگرسیونی ارایه شده در جدول (۳) استفاده گردید.

مقایسه شکل‌های (۳) و (۴) نشان داد با به کارگیری معادله های رگرسیونی ایجاد شده در این پژوهش منحنی مشخصه برآورد شده توسط توابع انتقالی با شاخه جذب منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده تطابق بهتری پیدا کرده است به طوری که رطوبت‌های برآوردی تعدیل شده برای تمام توابع انتقالی به جز وریکن و همکاران (۱۹۸۹) به خط یک به یک نزدیک‌تر شده است. با ملاحظه شکل‌های (۳) و (۴)، مشاهده می گردد معادله های رگرسیونی ایجاد شده در این پژوهش سبب شده توابع انتقالی مایر و جارویس (۱۹۹۹)، سکستون و همکاران (۱۹۸۶) و کمپل (۱۹۸۵) نسبت به بقیه توابع انتقالی افزایش عملکرد بهتری در برآورد منحنی مشخصه آبِ خاک داشته باشند.

برای بررسی کمّی دقت توابع انتقالی برای برآورد رطوبت‌های خاک در شاخه جذب و نیز ارزیابی کمّی معادله های رگرسیونی ایجاد شده در این پژوهش، محک‌های نسبت خطای متوسط هندسی و ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه و در جدول‌های (۴) و (۵) ارایه شده است. جداول (۴) و (۵) به ترتیب محک‌های آماری مربوط به شکل‌های (۳) و (۴) می باشد.

1-Over estimate



شکل٤- رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در برابر رطوبت‌های برآوردی تعدیل شده با توابع رگرسیونی استخراجی در این پژوهش در مکش‌های متناظر برای شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک

جدول۵- نتایج مقادیر شاخص‌های آماری برای توابع پارامتریک با استفاده از معادله رگرسیونی استخراجی در این پژوهش

تابع پارامتریک	ریشه میانگین مربعات خطا(سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب)	نسبت خطای متوسط هندسی
راولز و براکنسیک (۱۹۸۹)	۰/۰۶۶	۱/۲۵۱
سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲)	۰/۰۸۲	۱/۱۸۹
سکستون و همکاران (۱۹۸۶)	۰/۰۶۷	۱/۲۱۸
کمپل (۱۹۸۵)	۰/۰۸۳	۱/۲۰۹
مایر جارویس (۱۹۹۹)	۰/۰۳۴	۱/۲۲۳
وریکن و همکاران (۱۹۸۹)	۰/۱۳۰	۱/۴۵۱
وستن (۱۹۹۷)	۰/۰۶۷	۱/۱۳۹
وستن و همکاران (۱۹۹۹)	۰/۰۵۵	۱/۲۴۲
نوع اول یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱)	۰/۱۰۰	۱/۴۲۴
نوع دوم یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱)	۰/۰۹۸	۱/۲۵۷

اگرچه توابع انتقالی قادر به برآورد شاخه واجذب منحنی مشخص آبِ خاک نمی باشند (شکل ۲). با این وجود، شکل (۳) و جدول (۴) نشان می‌دهد در حالت اول (بدون استفاده از معادله های رگرسیونی ایجاد شده) توابع راولز و براکنسیک (۱۹۸۹) و مایر جارویس (۱۹۹۹) با ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۰۷۵ و ۰/۰۹۴ از عملکرد بهتری نسبت به بقیه توابع انتقالی، برخوردار هستند و توابع کمپل (۱۹۸۵)، نوع اول یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱) و وریکن و همکاران(۱۹۹۰) با ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۱۹۲، ۰/۱۷۴ و ۰/۱۶۶ بدترین عملکرد را در حالت اول دارند. علت عملکرد ضعیف تابع انتقالی وریکن و همکاران (۱۹۹۹)، برآورد کم مقدار n مدل ون‌گنوختن می باشد. نتایج به دست آمده برای شاخه واجذب منحنی مشخصه آبِ خاک توسط حق وردی و همکاران (۱۳۹۱)، نشان می‌دهد تابع انتقالی وریکن و همکاران (۱۹۸۹) کمترین دقت را در بین توابع انتقالی دارد که در این پژوهش نیز این تابع انتقالی برآورد مناسبی از شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک ندارد. همچنین نتایج پژوهش فولادمند و هادی پور (۱۳۹۰) نشان داد تابع انتقالی وستن و همکاران (۱۹۹۹) بهترین عملکرد را برای خاک‌های استان فارس دارد و توابع انتقالی ملی برآورد مناسبی از شاخه واجذب ندارد، در پژوهش حاضر توابع انتقالی بین‌المللی به ویژه راولز و براکنسیک (۱۹۸۵) عملکرد بهتری نسبت به توابع ملی دارد (جدول ۴). مقادیر نسبت خطای متوسط هندسی در جدول (۴) نشان میدهد توابع انتقالی کمپل (۱۹۸۵)، سکستون و همکاران (۱۹۸۶) نوع اول یعقوبی و رسول‌زاده (۱۳۹۱)، وستن (۱۹۹۷)، وستن و همکاران (۱۹۹۹) نسبت به دیگر توابع انتقالی بیشتر بیش برآورد انجام داده‌اند. مقدار نسبت خطای متوسط هندسی تابع انتقالی وریکن و همکاران (۱۹۸۹) ۱/۹۳۰ به دست آمده است (جدول ۴) در حالی که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا این تابع انتقالی برآورد نامناسب‌تر این تابع انتقالی را نشان می‌دهد و حاکی از عملکرد ضعیف این تابع دارد. علت کمتر بودن نسبت خطای متوسط هندسی این تابع در مقایسه با برخی توابع انتقالی دیگر ، پراکندگی نقاط اطراف خط یک به یک می باشد که سبب شده بعضی از نقاط بیش برآورد و برخی دیگر کم برآورد گردد و مجموع آن‌ها به عدد یک میل نماید. به نظر می رسد این ضعف محک آماری نسبت خطای متوسط هندسی در این گونه موارد بود و نیاز به ارایه محک آماری دیگر، مانند ریشه میانگین مربعات خطا برای تکمیل آن می باشد.

در حالت دوم رطوبت‌های برآورد شده با توابع انتقالی پارامتریک، با معادله‌های رگرسیونی استخراج شده در این پژوهش تعدیل گردید. شکل (۴) و جدول (۵) نشان می‌دهد در این حالت تابع انتقالی مایر و جارویس (۱۹۹۹) و وستن و همکاران (۱۹۹۹) با ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۵ بهترین عملکرد را بین توابع انتقالی پارامتریک دارند. در این حالت نیز تابع انتقالی وریکن و همکاران (۱۹۸۹) با ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۱۳۰ بدترین عملکرد را دارد. با مقایسه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا تابع انتقالی وریکن و همکاران (۱۹۸۹) در حالت اول (جدول ۴) و حالت دوم (جدول ۵) می توان نتیجه گرفت معادله‌های رگرسیونی استخراج شده در این پژوهش نتوانسته است سبب بهبود برآورد منحنی مشخصه گردد. علت آن پراکندگی زیاد نقاط و پایین بودن ضریب تبیین معادله رگرسیونی استخراجی (جدول ۳) برای این تابع می باشد. معادله‌های رگرسیونی به دست آمده در این پژوهش بیشترین تاثیر را در تابع انتقالی مایر و جارویس (۱۹۹۹) داشت به طوری که سبب شده، ریشه میانگین مربعات خطا این تابع از ۰/۰۹۴ (جدول ۴) به ۰/۰۳۴ (جدول ۵) کاهش یابد. در واقع با به کار معادله‌های

رگرسیونی ریشه میانگین مربعات خطا برای این تابع ۱۷۴ درصد کاهش یافته است.

مقدار ریشه میانگین مربعات خطا توابع ملی سپاسخواه و بندار(۲۰۰۲)، نوع اول یعقوبی و رسول زاده (۱۳۹۱) و نوع دوم یعقوبی و رسول‌زاده (۱۳۹۱) به ترتیب از ۰/۱۲۶ به ۰/۰۸۲(۵۴ درصد کاهش)، از ۰/۱۷۴ به ۰/۱ (۷۴درصد کاهش) و از ۰/۱۱۸ به ۰/۱ (۲۱درصد کاهش) تقلیل یافته است (جداول ۴ و ۵). درصد تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا بین حالت اول (بدون استفاده از معادله های رگرسیونی استخراجی) و حالت دوم (با استفاده از معادله های رگرسیونی استخراجی) برای توابع انتقالی بین‌المللی نشان می‌دهد توابع انتقالی مایر جارویس (۱۹۹۹)، وستن و همکاران (۱۹۹۹)، کمپل (۱۹۸۵)، سکستون و همکاران (۱۹۸۶) و وستن (۱۹۹۷) با تغییر ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۱۷۴، ۱۴۰، ۱۳۲، ۱۱۳و ۱۱۳ درصد، دارای بیشترین تغییرات می‌باشند که باعث بهبود برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک شده است. توابع انتقالی راولز و همکاران (۱۹۸۵)، نوع دوم یعقوبی و رسول‌زاده (۱۳۹۱) و وریکن و همکاران (۱۹۸۹) با تغییر ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۱۶، ۲۱ و ۲۷ درصد، دارای کمترین تغییرات می‌باشند که نسبت به دیگر توابع مورد پژوهش کمتر بهبود یافته‌اند.

مقدار نسبت خطای متوسط هندسی در حالت دوم (با استفاده از معادله‌های رگرسیونی استخراجی) نشان داد همچنان همه توابع انتقالی بیش برآورد کرده‌اند (جدول ۵). مقایسه نسبت خطای متوسط هندسی در جداول(۴) و (۵) نشان می‌دهد استفاده از معادله‌های رگرسیونی استخراجی در این پژوهش، سبب شده است که مقادیر نسبت خطای متوسط هندسی به یک نزدیکتر شده و در نتیجه از مقادیر بیش برآوردها و کم برآوردها در توابع انتقالی مختلف کاسته شود. به طوری که برای توابع انتقالی مانند کمپل (۱۹۸۵)، وستن (۱۹۹۷) و وستن و همکاران (۱۹۹۹) مقدار محک آماری نسبت خطای متوسط هندسی به ترتیب از ۳/۰۳۷، ۲/۴۷۷ و ۲/۴۱۰ به ۱/۲۰۹، ۱/۱۳۹ و ۱/۲۴۲ تغییر پیدا کرده است با مقایسه شکل‌های (۴) و (۵)، بهبود نسبت خطای متوسط هندسی مشهود است به طوری که نقاط به خط یک به یک نزدیک‌تر شده است.

نتیجه‌گیری

بیشتر توابع انتقالی با استفاده از داده‌های مربوط به شاخه واجذب منحنی مشخصه آبِ خاک گسترش یافته‌اند و توانایی برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آبِ خاک را ندارند در این پژوهش سعی شد با ایجاد معادله های رگرسیونی غیرخطی برای هر تابع انتقالی، برآوردهای انجام شده برای برآورد شاخه جذب تعدیل گردد. با توجه به درصد تغییرات مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و همچنین نزدیک شدن مقدار نسبت خطای متوسط هندسی به یک حاکی از آن است که استفاده از معادله های رگرسیونی استخراجی در این پژوهش موجب شده است که توابع انتقالی پارامتریک که برای شاخه واجذب منحنی مشخصه آبِ خاک می‌باشد برای برآورد شاخه جذب بهبود یافته و برآورد قابل قبولی ارایه دهد.

منابع

۱- ترابی فارسانی، ن. و ب، قهرمان. ۱۳۸۶. مقایسه چند تابع انتقالی متداول برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در چند خاک در ایران، مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۲ (۱): ۵۷.-۴۵.

۲- حق وردی، ا.، قهرمان، ب.، خشنود یزدی، ع.، جلینی، م. و ز. عربی. ۱۳۹۱. اعتبارسنجی و مقایسه چند تابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک برای پیش‌بینی میزان رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۹(۲): ۲۲-۱.

۳- رسول زاده، ع.، رضوی، س. و م. نیشابوری. ۱۳۹۱. ارزیابی توابع انتقالی در شبیه سازی شاخه جذبی منحنی مشخصه آبِ خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۴: ۲۱۸-۲۰۱.

۴- فولادمند، ح. و س. هادی پور. ۱۳۹۰. ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۸ (۱۵): ۳۷-۲۵.

۵- یعقوبی ع. و ع. رسول زاده. ۱۳۸۸. ایجاد توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد منحنی رطوبتی خاک، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آذر ماه، دانشگاه تهران.

6- Acutis, M. and D. Donatelli. 2003. SOILPAR 2.00: Software to estimate soil hydrological parameters and functions, European Journal of Agronomy, 18: 373-377.

7- Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media, Colorado State University, Hydrological paper, 3, 27p.

8- Buccigrossi, F., Caliandro, A., Rubino, R. and M. A. Mastro. 2009. Testing some pedo-transfer functions (PTFS) in Apulia region, Journal of Agricultural Engineering, 1: 19-31.

9- Baumgartner, N., Parkin, G. W. and D. E. Elrick. 1994. Soil water content and potential measured by hollow time domain refelectometery probe, Soil Science Society of America Journal, 58: 315-318.

10- Campbell, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Science, 117: 311-314.

11- Campbell, G.S. 1985. Soil physics with Basic, Transport Models for Soil–plant System, Elsevier, New York, 150p.

12- Cornelis, W. M., Ronsyn, J., Meirvenne, M. V. and R. Hartmann. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve, Soil Science Society of America Journal, 65: 638–648.

13- Dane, J. H. and G. C, Topp. 2002. Methods of soil analysis, Part 4, Physical method. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.

14- Givi, J., Prasher, S. O., and R. M. Patel. 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point, Agricultural Water Management, 70: 83-96.

15- Hutson, J. L. and A. Cass. 1987. A retentivity function for use in soil-water simulation models, Soil Science, 38: 105-113.

16- Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, Methods of soil analysis, Part2, Second Edition, Agronomy , Monograph, 9, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 539-579.

17- Mayr, T. and N. J. Jarvis. 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model, Geoderma, 91:1-9.

18- Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties, Unsaturated flow in hydraulic modeling, Theory and Practice, Kluwer Academic Publishers, 275-300.

19- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S. and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture, Soil Science Society of America Journal, 50, 1031-1036.

20- Sepaskhah, A. R. and H. Bondar. 2002. Estimating van Genuchten soil water retention curve from some soil physical properties, Iran Agricultural Research, 21: 105-118.

21- Shani, U. Hanks, R. J. Bresler, E. and C. A. S. Oliveira. 1987. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential water content relations, Soil Science Society of America Journal, 51: 298-302.

22- 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.

23- van Genuchten, M. TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.

24- Vereecken, H., Maes, J. and J. Feyen. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content, Soil Science, 148(6): 1-12.

25- Wösten, J. H. M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality In: E. G. Gregorich and M. R. Carter (Eds.). Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soils Science. Elsevier Publishers, USA, 221-245.

26- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A. and C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils, Geoderma, 90: 169-185.