

## برآورد برخی خصوصیات هیدرولیکی خاک با استفاده از توابع انتقالی

روزبه موذن زاده<sup>۱</sup> و بیژن قهرمان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۶

### چکیده

ظرفیت زراعی (Field Capacity, FC) و نقطه پژمردگی دائم (Permanent Wilting Point, PWP) در تعیین عمق خالص آب آبیاری موثر می‌باشند. با این حال اندازه‌گیری مستقیم این خصوصیات به خصوص در سطوح وسیع، مشکل، زمان بر و پرهزینه است. توابع انتقالی خاک جزو روش‌های غیر مستقیمی است که می‌تواند جایگزین روش‌های مستقیم گردد. در این تحقیق ابتدا عملکرد شش تابع انتقالی موجود در منابع در برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP بر روی ۱۱۲ نمونه خاک منتخب از شمال و شمال شرق کشور ارزیابی گردید. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE) برای توابع انتقالی اشاره شده موجود ما بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۷ و ۰/۰۳ تا ۰/۱۳ برای برآورد رطوبت به ترتیب در نقاط FC و PWP تغییر نمود. بنابراین توابع انتقالی جدیدی بر مبنای تکنیک رگرسیون چندگانه خطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و با استفاده از خصوصیات تعدادی از نمونه خاک‌ها (۹۰ نمونه) بسط و توسعه یافت و نتایج آن‌ها بر روی نمونه خاک‌های متفاوتی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تکنیک رگرسیون چندگانه خطی با اختصاص مقادیر ۰/۰۳۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲۷ و ۰/۰۲۴ برای شاخص RMSE به ترتیب در برآورد رطوبت در نقطه FC، PWP، آب قابل دسترس و آبدهی ویژه، و تکنیک شبکه عصبی با اختصاص مقادیر ۰/۰۱۳، ۰/۰۰۷، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۳ برای همین شاخص و در مورد همان خصوصیات، عملکرد مناسبی داشتند. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد متغیرهایی نظیر میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، بعد فرکتالی و مکش ورود هوا، برای نخستین بار در ورودی توابع انتقالی، توانست به مقدار قابل توجهی دقت نتایج را بالا ببرد، اگرچه تایید این نظریه نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس، آبدهی ویژه، اعتبارسنجی، بعد فرکتالی، میزان رطوبت.

<sup>۱</sup> - استادیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، ۰۹۱۵۱۵۹۱۱۲۴، romo\_sci@shahroodut.ac.ir (مسئول مکاتبه)

<sup>۲</sup> - استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، ۰۹۱۵۳۱۱۹۳۰۹، bijangh@um.ac.ir

## مقدمه

مدل‌های شبکه عصبی کارآیی آن‌ها را بهبود می‌بخشد، ولی برخی افزایش ورودی را الزامی بر بهبود نتایج توابع انتقالی نمی‌دانند (Manyame et al., 2007).

(Torabi and Ghahraman, 2007) دقت توابع قربانی و همایی (۱۳۸۱) را در برآورد رطوبت تعدادی از خاک‌های مشهد مورد ارزیابی قرار داده و نتایج بهتر را مربوط به پتانسیل ماتریک بالاتر دانستند. (Liao et al., 2014) به کمک مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت در یک بازه زمانی ۳۰۰ روزه و برای اعماق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر، معادله ریچاردز را واسنجی نموده و با استفاده از حل معکوس در برنامه HYDRUS-1D خصوصیات هیدرولیکی خاک را برآورد نمودند. برای این منظور از ۶ تابع انتقالی مرتبط استفاده نمودند تا تغییرات زمانی رطوبت در ۴ عمق مذکور را پیش‌بینی نمایند. (Zolfaghari et al., 2015) از ساختار توابع انتقالی با ماهیت شبکه عصبی برای برآورد شاخص‌های مکانیکی خاک با سه نوع ورودی؛ الف) خصوصیات خاک، ب) ویژگی‌های توپوگرافی و گیاهی و ج) ترکیبی از الف و ب؛ استفاده نموده و نتایج بندهای ب و ج را برتر از قسمت الف معرفی کردند. (Kamenickova and Larisova, 2014) عملکرد دو تابع انتقالی (Schaap et al., 1998) در قالب برنامه Rosetta و تابع (Wosten et al., 1998) را در برآورد میزان رطوبت مورد بررسی قرار دادند و عملکرد تابع دوم را با ریشه میانگین مربعات خطایی در حدود ۰/۰۲۶ در قیاس با تابع اول با ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۸ بهتر ارزیابی نمودند. (Mohanty et al., 2015) با تحقیق بر روی ۷۲۱ نمونه خاک از سرتاسر کشور هندوستان به منظور برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP با استفاده از شبکه عصبی به این نتیجه رسیدند که تعداد ۶ نرون در لایه پنهان با بهترین نتیجه همراه خواهد بود. در تحقیق ایشان توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری خاک ورودی توابع را تشکیل داده‌اند.

مبحث کاربرد توابع انتقالی توسعه یافته برای منطقه‌ای خاص، در مناطق دیگر، توسط برخی

خصوصیات هیدرولیکی خاک نظیر رطوبت از مهم‌ترین پارامترهای موثر در تحقیقات آب و خاک است که در مدل‌های آبیاری و زهکشی بکار می‌روند. از مهم‌ترین موارد کاربرد رطوبت می‌توان به تنظیم برنامه‌ریزی آبیاری اشاره نمود. اندازه‌گیری مستقیم رطوبت از یک سو مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی است و از طرف دیگر به روش اندازه‌گیری نیز وابسته است (Merdun, 2010). برای رفع این مشکل از روش‌های غیر مستقیم استفاده می‌گردد. از جمله روش‌های غیر مستقیم می‌توان به توابع انتقالی خاک اشاره نمود (Santra and Das, 2008).

توابع انتقالی امکان برآورد خصوصیات دیریافت از روی خصوصیات زودیافت خاک را فراهم می‌آورند. از مهم‌ترین خصوصیات زودیافت می‌توان به توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری اشاره نمود (Wosten et al., 1999). منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز از مهم‌ترین خصوصیات برآورد شده توسط توابع انتقالی می‌باشند (Wagner et al., 2001). با این حال تحقیقاتی در زمینه برآورد جرم مخصوص ظاهری نیز صورت پذیرفته است (Brahim et al., 2012). توابع برآورد کننده رطوبت را می‌توان در دو دسته نقطه‌ای و پارامتریک تقسیم‌بندی نمود (Acutis and Donatelli, 2003). نظر کلی بر آن است که توابع نقطه‌ای در قیاس با توابع پارامتریک در زمینه برآورد رطوبت خاک ارجحیت دارند (Vereecken et al., 2010). برای توسعه توابع انتقالی معمولاً از رگرسیون و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود (Sarmadian and Mehrjardi, 2008). رگرسیون در عین سادگی نتایج قابل قبولی به همراه داشته است (Liao et al., 2011). با این حال شبکه عصبی بدلیل آنکه نیازمند مدل‌های استقرایی نمی‌باشد، این توانایی را دارد که بیشترین تعداد خصوصیات خاک را از روی داده‌های اصلی برآورد نماید (Borgesien and Schaap, 2005). اگرچه برخی محققین بر این عقیده‌اند که افزایش تعداد ورودی

خلاصه‌ای از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده نمونه‌ها در جدول ۱ فهرست شده‌اند. به‌منظور ارزیابی عملکرد توابع موجود در منابع در برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP، از داده‌های مربوط به تمام نمونه‌ها استفاده گردید. در این تحقیق عملکرد توابع انتقالی Aina and Periaswamy (1985)، (1987)، Arruda et al. (1987)، Dijkerman (1988)، van den Oliveira et al. (2002)، Lal (1987)، Berg et al. (1997) در برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارائه توابع جدید در قالب تکنیک رگرسیون و شبکه‌های عصبی، داده‌ها بصورت تصادفی به دو دسته تقسیم‌بندی شدند. دسته اول شامل ۹۰ نمونه خاک که با هدف واسنجی روابط رگرسیونی و یا آموزش شبکه انتخاب شدند و دسته دوم شامل ۲۲ نمونه که برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در رگرسیون مهم‌ترین خصوصیات اندازه‌گیری نمونه‌ها از قبیل نسبت فراوانی ذرات، جرم مخصوص ظاهری، میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی، بعد فرکتالی خاک و مکش ورود هوا و ترکیبات مختلف این متغیرها به عنوان ورودی توابع انتقالی لحاظ گردید. در ادامه و با استفاده از تکنیک پیشرو و پسرو و با حفظ دقت توابع، توابعی با تعداد متغیرهای مستقل کمتر ارائه شد. در شبکه عصبی نیز ترکیبات مختلفی از نوع شبکه، تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نرون در لایه مخفی، تابع فعالیت و الگوریتم‌های مختلف آموزش شبکه به اجرا در آمد و شبکه‌ای که بهترین برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP را داشت، انتخاب شد. پس از برآورد رطوبت در این دو نقطه مهم، آب قابل دسترس که بیشترین مقدار آبی است که در حد فاصل دو آبیاری متوالی می‌تواند در اختیار گیاه قرار گیرد و بصورت تفاضل رطوبت در این دو نقطه تعریف می‌شود، محاسبه و با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. آبدهی ویژه نیز با استفاده از رابطه ۱ در ۲۲ نمونه خاک متعلق به دسته اعتبارسنجی، برآورد و بصورت مشابه با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. در نهایت به منظور ارزیابی و بررسی

محققین مورد تردید قرار گرفته است (Nemes et al., 2003). Tomasella and Hodnett (1998) اثر منطقه‌ای بودن خصوصیات توابع انتقالی را با ارزیابی عملکرد ضعیف توابع توسعه یافته برای مناطق معتدل، در نواحی گرمسیری خاطر نشان ساختند. بحث عدم تعمیم توابع انتقالی و تحقیقات اندک بر روی نقاط FC و PWP در منطقه مورد مطالعه و اهمیت این دو نقطه در تنظیم برنامه‌ریزی آبیاری از مهمترین دلایل انجام این تحقیق بودند. در این تحقیق ابتدا عملکرد برخی از توابع انتقالی موجود، در برآورد میزان رطوبت در نقاط FC و PWP ارزیابی گردید. سپس با توجه به نتایج ضعیف این توابع، اقدام به توسعه توابع جدید در قالب تکنیک رگرسیون‌های چندگانه خطی و شبکه‌های عصبی گردید.

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از داده‌های ۱۱۲ نمونه خاک از مناطق شمال (۴۲ نمونه از شهرهای آمل، بابل و کرج) و شمال شرق (۷۰ نمونه از شهر بجنورد) استفاده شد. نمونه‌های مربوط به منطقه شمال بصورت دست خورده و نخورده از لایه‌های سطحی خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) و از مرکز شبکه‌بندی‌های مربعی شکل به فاصله رئوس ۲۰۰ متر و نمونه‌های مربوط به منطقه شمال شرق بصورت تصادفی و از همان عمق برداشت شدند. بافت خاک و جرم مخصوص ظاهری بترتیب از روش هیدرومتری بایکاس و کلوخه و پارافین اندازه‌گیری شدند. اگرچه از کلاس‌های مختلف بافت خاک در نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق وجود داشت، با اینحال بیشترین فراوانی به بافت‌های لوم (۴۷ نمونه)، لوم رسی (۲۵ نمونه) و لوم شنی (۱۵ نمونه) تعلق داشت. میانگین هندسی قطر ذرات ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) برای تمامی نمونه‌ها توسط روابط Shirazi and Boersma (1984) محاسبه شدند. با استفاده از دستگاه صفحات فشاری میزان رطوبت هر نمونه در سه تکرار و در پتانسیل‌های ماتریک متفاوت از جمله ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد.

سال ششم • شماره بیست و چهارم • تابستان ۱۳۹۵

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})}{n} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

در این روابط  $\mu$ ،  $n$ ،  $(\theta_v)_{FC}$ ،  $Y_{obs}$ ،  $Y_{sim}$  و  $\bar{Y}$  به ترتیب آبدهی ویژه، تخلخل، رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی، مقادیر اندازه‌گیری، برآورد شده و متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت نمونه‌ها می‌باشند.

عملکرد توابع انتقالی موجود و توابع جدید پیشنهادی، از سه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) استفاده شد که روابط آن‌ها در معادلات ۲ تا ۴ ارائه شده‌اند.

$$\mu = n - (\theta_v)_{FC} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{n} \right]^{0.5} \quad (2)$$

جدول (۱): برخی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی نمونه خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق (۱۱۲ نمونه)

فاکتور	فراوانی نسبی ذرات (درصد)			جرم مخصوص ظاهری ( $gr. cm^{-3}$ )	رطوبت حجمی ( $cm^3. cm^{-3}$ )	
	شن	سیلت	رس		FC	PWP
بیشترین مقدار	۷۷/۲	۵۹/۶	۳۷/۲	۱/۶۳	۰/۳۹	۰/۲۱
کمترین مقدار	۱۰/۲	۱۴/۶	۸/۲	۱/۳۷	۰/۲۲	۰/۰۸
میانگین مقادیر	۳۸/۸۵	۳۹/۳۳	۲۱/۸۱	۱/۴۴	۰/۳	۰/۱۵
انحراف استاندارد	۱۲/۷	۱۰	۷/۲۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳
ضریب تغییرات	۳۳	۲۵/۴	۳۳	۳/۱	۱۴	۲۰

## نتایج و بحث

### ارزیابی عملکرد توابع انتقالی موجود

شکل ۱ نشان دهنده مقادیر رطوبت برآورد شده به کمک توابع انتقالی موجود در منابع و مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده آن‌ها در نقاط FC و PWP در تمامی نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق (۱۱۲ نمونه) است. اگرچه به کمک شکل ۱ تا حدودی می‌توان به میزان خطا در برآورد رطوبت در هر یک از توابع پی برد، با اینحال آنچه با اطمینان بیشتر از این شکل منتج می‌گردد، بیش یا کم برآورد رطوبت در هر یک از این توابع است. صرفنظر از عملکرد تابع van den Berg et al. (1997) که تنها در نقطه PWP تعریف شده است (شکل ۱-۵)، تنها توابع Lal و Arruda et al. (1987) و Lal (1987) در هر دو نقطه رطوبتی مورد بحث رفتار یکسانی داشتند؛ بطوریکه تابع اول با بیش برآورد و تابع دوم با کم‌برآورد رطوبت

در هر دو نقطه همراه بودند. اگرچه پراکنش نقاط رطوبتی در اطراف خط ۱:۱ در تابع Dijkerman (1988) مناسب‌تر از سایر توابع بنظر می‌رسد، با اینحال تمایل به بیش برآورد و کم برآورد به ترتیب در نقاط FC و PWP در آن به چشم می‌آید (شکل ۱-ج). تابع Oliveira et al. (2002) در نقطه FC رفتار نسبتاً متعادلی داشته، حال آن‌که در PWP با بیش برآورد رطوبت همراه بوده است (شکل ۱-و). تنها تابعی که در نقاط FC و PWP رفتار کاملاً متناقضی داشته، تابع Aina and Periaswamy (1985) بوده که در نقاط مذکور به ترتیب با بیش و کم برآورد رطوبت همراه بوده است (شکل ۱-الف). نکته لازم به ذکر آن است که منظور از بیش یا کم برآورد رطوبت که در بالا بدان اشاره شده تنها در مورد تعداد نمونه‌ها است و مقادیر عددی بیش یا کم برآورد رطوبت و یا عملکرد کلی توابع مذکور از روی شکل ۱ قابل استنتاج نبوده و نیازمند بررسی شاخص‌های آماری است که در ادامه

بحث، کاملاً تایید کننده نتایجی است که در این تحقیق گرفته شده است. شاید همسانی خصوصیات ذاتی و کانی‌شناسی میان خاکهای مورد استفاده در تحقیق مذکور و تحقیق حاضر و همچنین شباهت نسبی دامنه تغییرات اصلی‌ترین خصوصیات خاک‌ها نظیر فراوانی نسبی ذرات و جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها را بتوان از دلایل این موضوع برشمرد.

در جدول ۲ نیز مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد در شش تابع انتقالی مورد بحث در نقاط FC و PWP آورده شده‌اند. همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود و نتایج جدول ۲ نیز آن را تایید می‌نماید، در برآورد رطوبت در نقطه FC تمامی توابع به جز تابع (1987) Lal با بیش برآورد همراه بوده‌اند. صرف‌نظر از بیش برآورد یا کم برآورد رطوبت، تغییرات دو شاخص RMSE و ME در هر دو نقطه FC و PWP کاملاً با هم تطابق دارد، به نحوی که با افزایش مقدار شاخص RMSE، قدرمطلق شاخص ME نیز افزایش یافته است. در نقطه FC بهترین برآورد رطوبت را می‌توان به توابع (2002) Oliveira et al. و Dijkerman (1988) و بدترین برآورد را به تابع Aina and Periaswamy (1985) منسوب دانست. در مورد نقطه PWP نیز بهترین نتایج مربوط به توابع (1997) van den Berg et al.؛ (1988) Dijkerman و تا حدودی (1987) Lal می‌باشد. مقایسه نتایج جدول ۲ در دو نقطه FC و PWP نشان دهنده آن است که صرف‌نظر از مناسب بودن یا نبودن برآورد رطوبت، توابع (1988) Dijkerman؛ (1987) Arruda et al. و Lal (1987) دارای ثبات نسبی عملکرد در دو نقطه رطوبتی فوق بودند، در حالی که توابع Aina and Periaswamy (1985) و Oliveira et al. (2002) در نقاط مذکور نتایج کاملاً متفاوتی به همراه داشتند، به طوری که تابع اول در نقطه PWP و تابع دوم در نقطه FC نتایج بهتری داشتند.

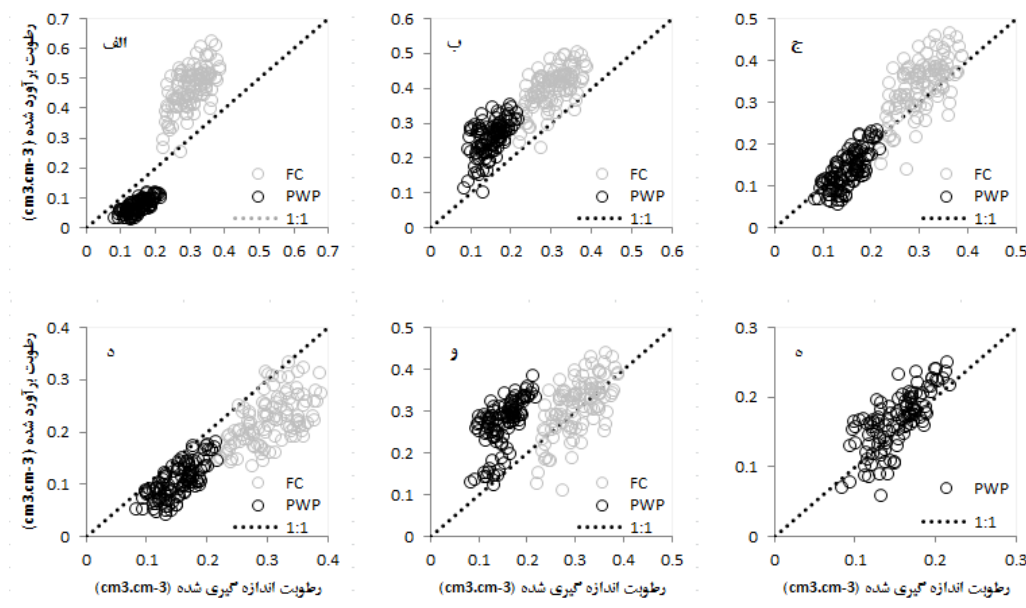
مطالعه تحقیقات مرتبط در این زمینه نشان‌دهنده این موضوع مهم است که نوع متغیرهای مستقلی که در برآورد رطوبت در یک پتانسیل ماتریک خاص استفاده می‌گردند نه تنها بایستی بیانگر وضعیت

بیان می‌گردد. نکته مهم در مورد عملکرد توابع مذکور آن است که این بیش یا کم برآورد رطوبت تنها در نقاط FC و PWP صادق است و در مورد آب قابل دسترس (TAW) که بصورت تفاضل رطوبت در این نقاط تعریف می‌شود، وضعیت متفاوت خواهد بود. در مواردی که مقادیر رطوبت در هر دو نقطه FC و PWP به ترتیب بیش برآورد یا کم برآورد می‌گردند؛ مشابه آنچه به ترتیب در توابع (1987) Arruda et al. و Lal (1987) رخ داده است؛ و می‌تواند حکایت از عملکرد نامناسب آن تابع خاص در هر کدام از این نقاط رطوبتی داشته باشد، با این حال اختلاف این مقادیر که بیانگر آب قابل دسترس است می‌تواند با مقادیر واقعی آن نزدیکی مناسبی داشته و عملکرد آن تابع خاص را صرفاً در مورد برآورد آب قابل دسترس در حد مطلوب نگاه دارد، به شرط آنکه میزان تغییرات افزایشی یا کاهش رطوبت در هر دو نقطه FC و PWP به یک میزان باشد.

تابع انتقالی (1985) Aina and Periaswamy که با بیش و کم برآورد رطوبت به ترتیب در نقاط FC و PWP همراه بوده، صرف‌نظر از عملکردش در همین نقاط رطوبتی، قطعاً با بیش برآورد دو چندان در مورد آب قابل دسترس همراه خواهد بود که کاربرد آن موجب تلفات آب در هر دور آبیاری و در سطح وسیع تهدید کننده منابع آب زیرزمینی خواهد بود، همان چیزی که هدف تحقیق حاضر جلوگیری از آن می‌باشد. (2012) Botula et al. عملکرد برخی از توابع انتقالی فوق را بر روی تعدادی از نمونه خاک‌های کشور کنگو مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که توابع (2002) Oliveira et al. و Dijkerman (1988) با  $RMSD = 0/04$  بهترین و تابع (1985) Aina and Periaswamy با  $RMSD = 0/23$  بدترین عملکرد را در برآورد رطوبت در FC داشته‌اند. همچنین تابع (1997) van den Berg et al. با  $RMSD = 0/02$  و تابع (2002) Oliveira et al. با  $RMSD = 0/07$  به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را در برآورد رطوبت در نقطه PWP داشته‌اند که نتایج تحقیق ایشان از نقطه نظر نحوه عملکرد توابع مورد

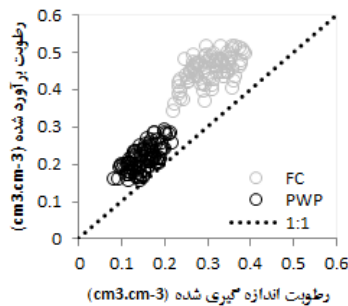
ابتدا سعی شد تا ساختار تابع (Dijkerman (1988) به عنوان اساس ساختار توابع انتقالی پیشنهادی جدید قرار گیرد. بدین منظور از توابعی استفاده شد که فقط شامل همان متغیرهای مستقلی بودند که تابع (Dijkerman (1988) در برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP از آن‌ها استفاده نموده بود. نتایج مربوط به این توابع در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد توابع جدید در هر دو نقطه FC و PWP با بیش برآورد رطوبت همراه بودند. مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد در نقطه FC ( $RMSE=0/15$  و  $ME = -0/146$ ) و PWP ( $RMSE=0/068$  و  $ME = -0/063$ ) با نتایج جدول ۲ نشان دهنده آن است که نه تنها عملکرد توابع جدید بهبود نیافته، بلکه توابع مذکور در قیاس با تابع اصلی (Dijkerman (1988) از دقت پایین‌تری برخوردار هستند.

نگهداشت رطوبت در همان پتانسیل ماتریک خاص باشند، بلکه بایستی معرف شرایط فیزیکی حاکم بین ذرات، خصوصیات کانی‌شناسی و نحوه آرایش ذرات نیز باشند. از آنجا که نوع رس موجود در نمونه خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق عمدتاً از نوع کائولینیت بوده که خاصیت تورم و انبساط و در نتیجه جذب رطوبت کمی دارند، در رطوبت‌های بالای خاک که مشکل محتوای رطوبت وجود ندارد، نظیر نقطه رطوبتی FC، بیش برآورد توابع انتقالی مورد بحث در این نقطه رطوبتی قابل توجیه است (Medina et al., 2002). این توجیه در بیش برآورد تابع (Arruda et al. (1987) که در برآورد رطوبت در نقطه FC از میزان رس استفاده می‌نماید، شاید موجه و ملموس‌تر باشد. مقایسه نتایج جدول ۲ نشان دهنده آن است که تابع (Dijkerman (1988) در هر دو نقطه FC و PWP بهترین عملکرد را داشته است. از اینرو در



شکل (۱): مقادیر اندازه‌گیری و برآوردی رطوبت در نقاط FC و PWP به کمک توابع الف) آینا و پریاسوامی (۱۹۸۵)، ب) آرودا و همکاران (۱۹۸۷)، ج) دیژکرمان (۱۹۸۸)، د) لال (۱۹۷۸)، و) اولیویرا و همکاران (۲۰۰۲)، ه) ون‌دنبرگ و همکاران (۱۹۹۷)؛ خط

چین: خط ۱:۱



شکل (۲): مقادیر رطوبت اندازه‌گیری و برآورد شده در نقاط FC و PWP به کمک تابع انتقالی جدید، دقیقاً با همان متغیرهای مستقل بکار رفته در ساختار تابع انتقالی دیژکرمان (۱۹۸۸)

در دقت توابعی که از کربنات کلسیم به عنوان ورودی توابع برآورد کننده رطوبت استفاده می‌کنند و توابعی که فاقد این ورودی هستند مشاهده نشده است درحالی‌که Rajkai and Varallyay (1992) این متغیر را دومین متغیر مستقل تاثیرگذار در برآورد میزان رطوبت در پتانسیل ماتریک ۱۴۰۰- کیلوپاسکال معرفی کرده‌اند. نتایج تحقیق Rab et al. (2011) در زمینه برآورد رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی در کشور استرالیا بیانگر آن است که تابع انتقالی با دو ورودی شامل میزان رس و کربن آلی بهترین عملکرد را داشته (RMSE=۲/۸۵ و  $R^2=۰/۹۵$ ) درحالی‌که افزایش تعداد ورودی توابع به سه پارامتر (میزان رس، انحراف معیار هندسی قطر ذرات و میزان کربن) عملکرد تابع انتقالی را کاهش داده است (RMSE=۳/۸۳ و  $R^2=۰/۹۰$ ). بنابراین افزایش تعداد ورودی توابع همواره منجر به بهبود نتایج نمی‌شود.

Walczak et al. (2006) از جرم مخصوص ظاهری و تخلخل به منظور برآورد رطوبت در پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلوپاسکال استفاده کردند. نتایج مطالعه Borgesen and Schaap (2005) نشان داد حذف متغیر جرم مخصوص ظاهری منجر به افزایش ریشه میانگین مربعات خطا شده است درحالی‌که Schaap and Leij (1998) با مطالعه پایگاه داده‌ای UNSODA به این نتیجه رسیدند که اضافه شدن این متغیر باعث کاهش بسیار اندکی در ریشه میانگین مربعات خطا شده ولی Schaap et al. (2001) تاثیر افزوده شدن جرم مخصوص ظاهری به ورودی توابع بر روی کاهش

نتایج نامناسب توابع موجود انگیزه‌ای برای بسط و توسعه توابع انتقالی جدید به منظور برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP آب قابل دسترس و آبدهی ویژه بود. در این راستا و برخلاف توابع پیشنهادی اخیر (شکل ۲) که از ساختار تابع Dijkerman (1988) تبعیت می‌نمود، سعی شد از تمامی پارامترهای اصلی اندازه‌گیری شده نمونه‌ها و پارامترهای دیگری که از روی پارامترهای اصلی قابل برآورد بودند به عنوان ورودی توابع انتقالی جدید بهره گرفته شود.

یکی از موارد تاثیرگذار بر روی دقت عملکرد توابع انتقالی در برآورد رطوبت خاک، تعداد و نوع متغیرهای مستقل بکار رفته در ساختار این توابع است (Haghverdi et al., 2012) که البته پیچیده نیز بنظر می‌رسد زیرا که اضافه شدن تعداد ورودی توابع همواره الزامی برای بهبود نتایج نمی‌باشد (Hernadi and Mako, 2014). البته ذکر این نکته نیز ضروری به نظر می‌رسد که مقایسه مطالعات مختلف انجام شده از نقطه نظر نوع و تعداد متغیرهای مستقل و میزان تاثیرگذاری آن‌ها بر روی برآورد رطوبت شاید در برخی موارد نتایج گمراه‌کننده‌ای به همراه داشته باشد زیرا که نمونه خاک‌های مورد استفاده در این تحقیقات به احتمال زیاد اساساً منشاء متفاوتی داشته و از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ممکن است کاملاً متفاوت باشند. با اینحال بررسی برخی مطالعات در این زمینه می‌تواند در روند نتیجه‌گرایی این مبحث موثر واقع شود. به عنوان مثال Khodaverdiloo et al. (2011) نشان دادند که هیچگونه اختلاف معنی‌داری

رس غالب (Botula et al., 2012)، دامنه پتانسیل ماتریک (Vereecken et al., 2010)، میزان مواد آلی (Yi et al., 2013) و تفاوت در خصوصیات ذاتی و کانی شناسی (Brillante et al., 2014) نیز از عوامل تاثیرگذار بر دقت عملکرد توابع انتقالی می‌باشند.

خطا را تنها در بازه پتانسیل ماتریک صفر تا ۳۳- کیلوپاسکال گزارش نمودند. این تفاوت نتایج حکایت از آن دارد که علاوه بر تعداد و نوع متغیرهای مستقل در ورودی توابع انتقالی برآورد کننده میزان رطوبت خاک، اثر منطقه‌ای بودن (Nanko et al., 2014)، نوع

جدول (۲): مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP در توابع انتقالی مورد بحث

شاخص ارزیابی عملکرد						تابع انتقالی
PWP			FC			
R <sup>2</sup>	ME	RMSE	R <sup>2</sup>	ME	RMSE	
۰/۵۶	۰/۰۸۲	۰/۰۸۴	۰/۳۸	-۰/۱۵۹	۰/۱۶۸	آینا و پریاسوامی (۱۹۸۵)
۰/۳۳	-۰/۱۰۲	۰/۱۱	۰/۳۷	-۰/۰۹۵	۰/۱۰۵	آرودا و همکاران (۱۹۸۷)
۰/۵۴	۰/۰۱۷	۰/۰۳۴	۰/۳۸	-۰/۰۳۳	۰/۰۶۱	دیژکرمان (۱۹۸۸)
۰/۵۴	۰/۰۴۸	۰/۰۵۳	۰/۳۱	۰/۰۸۴	۰/۰۹۴	لال (۱۹۷۸)
۰/۳۸	-۰/۱۱۹	۰/۱۲۷	۰/۴	-۰/۰۰۵	۰/۰۵۱	اولیویرا و همکاران (۲۰۰۲)
۰/۵۳	-۰/۰۱۳	۰/۰۳۱	-	-	-	ون دنبرگ و همکاران (۱۹۹۷)

RMSE=۰/۱۸ بدترین عملکرد را داشتند که از نقطه نظر نوع تابع مورد استفاده و اختلاف عملکرد، تایید کننده نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر می‌باشد. همچنین ایشان عملکرد تابع (Dijkerman (1988) را در برآورد رطوبت در نقطه پژمردگی جزو بهترین توابع معرفی کرده‌اند (RMSE=۰/۰۴) که مشابه نتیجه به دست آمده در تحقیق حاضر می‌باشد.

اگرچه Nemes and Rawls (2006) کاربرد خصوصیات توزیع اندازه ذرات در برآورد رطوبت در پتانسیل ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال را مورد ارزیابی قرار داده و هیچ خصوصیتی از این پارامتر را به عنوان یک عامل تاثیرگذار معرفی نکردند و Wosten et al. (2001) نیز در مقایسه ۲۱ تابع انتقالی به منظور برآورد رطوبت به این نتیجه رسیدند که استفاده تنها از فراوانی اندازه ذرات منجر به نتایج نامطلوب بخصوص در پتانسیل‌های ماتریک پایین‌تر خواهد شد (RMSE=۰/۱۱)، با اینحال نتایج Ostovari et al. (2015) بر روی ۲۱۰ نمونه خاک از پایگاه داده‌ای UNSODA و ۴۵ نمونه از پایگاه داده‌ای HYPRES نشان داده که میزان رس بیشترین تاثیر را در برآورد رطوبت در نقطه پژمردگی داشته و افزوده شدن جرم

آنچنان که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد تابع Oliveira et al. (2002) در برآورد میزان رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی با اختلاف بسیار کمی بهتر از تابع (Dijkerman (1988) عمل کرده است که این مورد می‌تواند به این دلیل باشد که تابع Dijkerman (1988) تنها از یک متغیر ورودی (میزان شن) در برآورد رطوبت در نقطه مذکور استفاده می‌نماید درحالی‌که تابع Oliveira et al. (2002) از دو متغیر (میزان رس و سیلت) استفاده می‌نماید که احتمالاً می‌تواند تبیین کننده بهتری از میزان رطوبت باشد (Vereecken et al., 2010). صرفنظر از اختلاف بسیار اندک دو تابع مذکور در برآورد رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی، تابع (Dijkerman (1988) در نقطه پژمردگی نیز بهترین عملکرد را داشته است درحالی‌که تنها از یک متغیر ورودی (میزان رس) برای برآورد رطوبت استفاده نموده است. نتایج تحقیق Ostovari et al. (2015) نشان داد که توابع Oliveira et al. (2002) و (Dijkerman (1988) در برآورد رطوبت در نقطه FC به ترتیب با اختصاص مقادیر RMSE=۰/۱۱ و RMSE=۰/۱۲ بهترین عملکرد و تابع Aina and Periaswamy (1985) با اختصاص مقدار



مخصوص ظاهری به ورودی توابع تاثیر ناچیزی داشته است. نتایج تحقیق اخیر می‌تواند تایید کننده نتیجه به دست آمده در تحقیق حاضر مبنی بر عملکرد مناسب تابع (Dijkerman (1988) در برآورد رطوبت در نقطه PWP تنها با استفاده از یک متغیر ورودی (میزان رس) باشد.

توابع جدید پیشنهادی در قالب روابط رگرسیونی معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) در ۹۰ نمونه خاک (مجموعه واسنجی) به صورت زیر بدست آمدند:

### رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی مصنوعی

توابع جدید پیشنهادی در قالب روابط رگرسیونی معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) در ۹۰ نمونه خاک (مجموعه واسنجی) به صورت زیر بدست آمدند:

$$\theta_{-33} = -0.584 - 0.238d_g + 0.0126(\sigma_g)^{0.5} + 0.289D + 0.00835h_b \quad (R^2 = 0.81) \quad (5)$$

$$\theta_{-1500} = -2.36 - 0.023d_g - 0.00263(\sigma_g)^{0.5} + 0.876D + 0.0253(h_b)^{0.5} \quad (R^2 = 0.93) \quad (6)$$

در این روابط  $\theta_{-33}$  و  $\theta_{-1500}$  به ترتیب بیانگر میزان رطوبت در نقاط FC و PWP؛  $d_g$  و  $\sigma_g$  به ترتیب میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات می‌باشند که با استفاده از رابطه (Shirazi and Boersma (1984)؛  $D$  و  $h_b$  به ترتیب بعد فرکتالی و مکش ورود هوا که به کمک رابطه Tyler

جدول (۳): شاخص‌های ارزیابی عملکرد توابع انتقالی جدید رگرسیونی و شبکه عصبی (مقادیر داخل پرانتز) در برآورد رطوبت، آب قابل دسترس و آبدهی ویژه

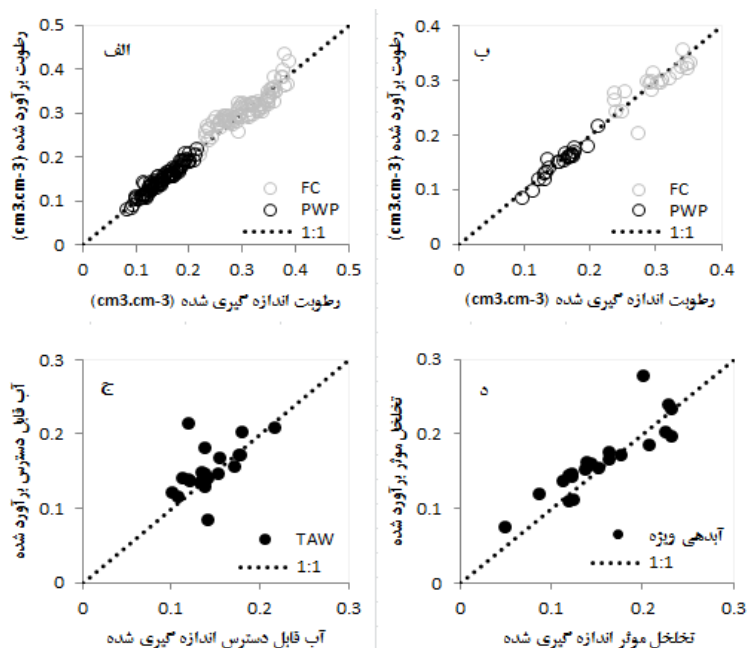
مرحله اعتبارسنجی		مرحله واسنجی		پارامتر برآورد شده
RMSE	ME	RMSE	ME	
۰/۰۳۵ (۰/۰۱۱)	۰ (-۰/۰۰۰۲)	۰/۰۱۹ (۰/۰۰۷)	۰ (۰)	ظرفیت زراعی
۰/۰۱ (۰/۰۰۷)	۰/۰۰۶ (-۰/۰۰۱۲)	۰/۰۰۹ (۰/۰۰۳)	۰/۰۰۳۶ (۰/۰۰۲)	نقطه پژمردگی
۰/۰۲۷ (۰/۰۱۳)	-۰/۰۰۵ (۰/۰۰۱)	۰/۰۱۶ (۰/۰۰۵)	-۰/۰۰۳ (۰/۰۰۱۵)	آب قابل دسترس
۰/۰۲۴ (۰/۰۱۱)	-۰/۰۰۷ (۰/۰۰۰۲)	۰/۰۱۹ (۰/۰۰۸)	۰ (۰/۰۰۰۱)	آبدهی ویژه

در مرحله اعتبارسنجی) با مقادیر مشابه توابع موجود در منابع (جدول ۲)، حکایت از برتری توابع پیشنهادی

مقایسه مقادیر شاخص RMSE حاصل از توابع انتقالی جدید در برآورد رطوبت در نقاط FC و PWP

جدید در قیاس با عملکرد بدترین (van den Berg et al., 2002) و بهترین (Oliveira et al., 1997) توابع موجود در رابطه با برآورد رطوبت در نقطه PWP به ترتیب با کاهش ۹۲ و ۶۵ درصدی در مقدار شاخص RMSE همراه بوده است.

دارد. عملکرد تابع جدید در قیاس با بدترین (Aina and Periaswamy, 1985) و بهترین (Oliveira et al., 2002) توابع موجود در برآورد رطوبت در نقطه FC منجر به کاهش ۷۹ و ۳۱ درصدی RMSE شده است. همچنین تابع انتقالی



شکل (۳): رطوبت اندازه‌گیری و برآورد شده در نقاط FC و PWP برای مجموعه واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب)؛ آب قابل دسترس (ج) و آبدهی ویژه (د) در مرحله اعتبارسنجی به کمک توابع انتقالی جدید رگرسیونی

(Merdun et al., 2006; Yi et al., 2013). مقایسه شکل‌های ۱ و ۳ بیانگر آن است که در توابع جدید پراکنش نقاط در نزدیکی خط ۱:۱ به مراتب مناسب‌تر از توابع انتقالی موجود می‌باشد، که حکایت از خطای کمتر توابع مذکور دارد. به منظور تحلیل بهتر نتایج، مقادیر RMSE در برآورد هر چهار پارامتر اصلی و در مرحله اعتبارسنجی در شکل ۴ نشان داده شده است.

Borgeses and Schaap (2005) دامنه تغییرات شاخص RMSE در برآورد رطوبت PWP در توابع پارامتریک خود را ۰/۳۱ تا ۰/۴۵ گزارش نمودند، درحالی‌که مقدار مذکور در این تحقیق در دامنه ۰/۰۹ تا ۰/۰۱ قرار داشت. از دلایل این برتری می‌توان به خطای پارامتریزاسیون اشاره نمود که در توابع انتقالی پارامتریک غیر قابل اجتناب است



شکل (۴): مقادیر RMSE در برآورد رطوبت، آب قابل دسترس و آبدهی ویژه به کمک توابع جدید در مجموعه اعتبارسنجی

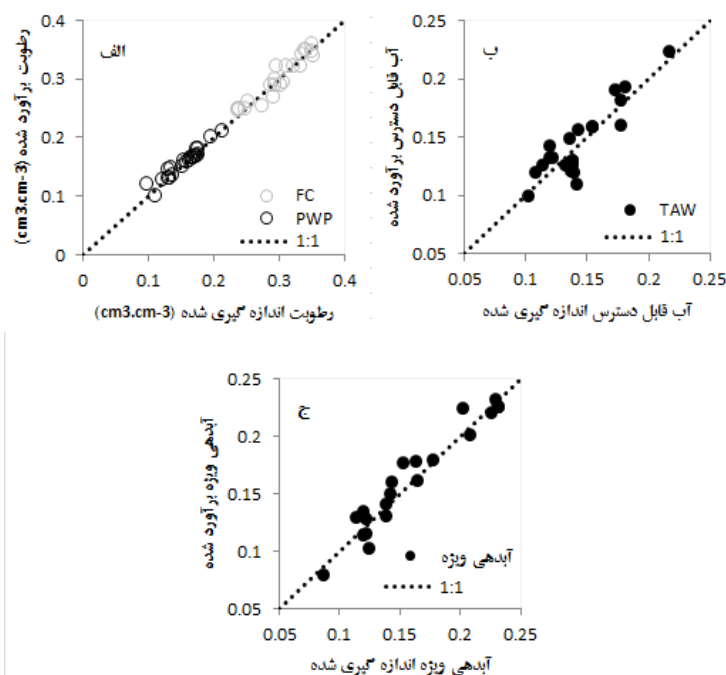
دست آمدند که نشان از عملکرد مناسب توابع به دست آمده در این تحقیق دارد (Santra and Das, 2008). اگرچه مقادیر پیش‌بینی شده برای آبدهی ویژه در قالب توابع انتقالی در سایر تحقیقات وجود ندارد، با اینحال مقایسه مقادیر شاخص RMSE در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی با سایر خصوصیات به دست آمده، حکایت از برآورد خوب آن دارد بنحوی که در مرحله اعتبارسنجی توابع رگرسیونی، بهترین نتیجه (RMSE=۰/۰۲۴) بعد از برآورد رطوبت در نقطه پڑمردگی (RMSE=۰/۰۱) به این خصوصیت تعلق دارد.

به منظور برآورد بهتر خصوصیات هیدرولیکی خاک، امکان برآورد این خصوصیات در قالب توابع با ماهیت شبکه‌های عصبی مورد ارزیابی قرار گرفت. دقت نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی تا حدود زیادی به انتخاب تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نرون در لایه‌های مخفی، قوانین آموزش و تابع انتقال بستگی دارد. در این تحقیق تمامی ترکیبات ممکن متشکل از نوع شبکه، تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نرون‌ها در لایه‌های مخفی و قوانین آموزش به اجرا در آمدند تا بهترین نتیجه ممکن حاصل گردد. مقایسه نتایج حاصل از این اجراها نشان داد که بهترین نتایج متعلق به شبکه عصبی پرسپترون چند لایه، دارای یک لایه مخفی با الگوریتم آموزش مومنتوم و تابع انتقال تانژانت آکسون و همین مشخصات در لایه خروجی بوده است. مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رطوبت در نقاط FC و PWP، آب قابل دسترس و آبدهی ویژه به کمک توابع انتقالی با ماهیت شبکه عصبی در شکل ۵ نمایش و مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای همین خصوصیات در جدول ۳ آمده‌اند. نتایج جدول ۳ و شکل ۵ بیانگر عملکرد بسیار خوب توابع با ماهیت شبکه عصبی در برآورد رطوبت خاک در دو نقطه پتانسیلی مهم FC و PWP است. مقادیر بالای ضریب  $R^2$  نشان دهنده همبستگی بالای خصوصیات اندازه‌گیری و برآورد شده است اگرچه این مقدار برای آب قابل دسترس در قیاس با سایر خصوصیات کمتر

با توجه به نتایج شکل ۴ کمترین و بیشترین خطای برآورد به ترتیب در رطوبت PWP و FC رخ داده است. عملکرد ضعیفتر توابع انتقالی در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است (Givi et al., 2004; Haghverdi et al., 2012). مقایسه مقادیر شاخص RMSE حکایت از کاهش ۷۱ درصدی در نقطه PWP نسبت به FC دارد، درحالیکه همین کاهش در تحقیق Merdun et al. (2006) و Santra and Das (2008) به ترتیب ۶۴ و ۴۵ درصد به دست آمده است. از مهمترین دلایل عملکرد ضعیفتر توابع در برآورد رطوبت در نقطه FC در قیاس با PWP، محتوای بالای رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر است که منجر به تغییرات بیشتر شده و این حقیقت که محتوای رطوبت در لوله‌های موئین و ناحیه ورود هوا به مراتب بیشتر تحت تاثیر ساختمان خاک و توزیع اندازه ذرات قرار دارد که تنها بصورت غیر مستقیم در توابع انتقالی بروز یافته است (Nemes et al., 2006). البته در تحقیق حاضر و در راستای رفع این مشکل سعی شد تا تاثیر این خصوصیات بسیار مهم با کاربرد پارامترهای مهمی نظیر میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات و مکش ورود هوا تا حد امکان لحاظ گردند. شاید تاثیر این امر را بتوان در مقایسه مقادیر شاخص RMSE در برآورد رطوبت در نقطه FC به کمک روابط رگرسیونی در تحقیق Yi et al. (2013) (RMSE=۰/۰۳۵) و تحقیق حاضر (RMSE=۰/۰۰۹) درک نمود، هرچند به دلیل متفاوت بودن نمونه‌های خاک نمی‌توان با قطعیت این نظریه را تایید نمود. میزان خطا در برآورد آب قابل دسترس در تحقیق Merdun et al. (2006) در مرحله اعتبارسنجی نتایج حاصل از رگرسیون (RMSE=۰/۰۲۹) به مقدار متناظر آن در این تحقیق (RMSE=۰/۰۲۷) نزدیک است، درحالیکه مقادیر مشابه برای توابع انتقالی (Santra and Das (2008); Wosten et al. (1999); Hodnett and Tomasella و Schaap et al. (2001) به ترتیب ۰/۰۳۲، ۰/۰۳۱، ۰/۰۶۶ و ۰/۰۴۷ به

در حالت اشباع و FC با استفاده از شبکه عصبی توابعی ارائه نمودند که مقادیر شاخص‌های ME، RMSE و  $R^2$  در حالت اشباع به ترتیب ۰/۰۰۴۲، ۰/۰۲۳ و ۰/۹۸ و در نقطه FC به ترتیب ۰/۰۰۲۹، ۰/۰۳۹ و ۰/۸۶ به دست آمد که مقدار شاخص RMSE در تحقیق ما در قیاس با تحقیق مذکور در حدود ۷۲ درصد کمتر بدست آمده است.

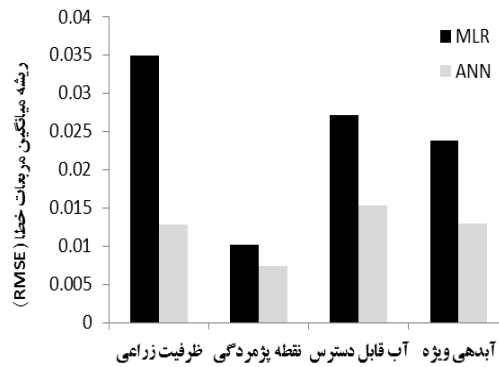
است که این موضوع در شکل ۵-ب نیز قابل تایید است. مقادیر پایین شاخص ME حکایت از آن دارد که بیش یا کم برآورد این خصوصیات بسیار ناچیز بوده است. با انتخاب شاخص RMSE به عنوان معیار خطا، نتایج جدول ۳ نشان دهنده آن است که مجدداً خطای برآورد رطوبت در پتانسیل ماتریک بیشتر، بیشتر است که در توابع با ماهیت رگرسیون نیز این امر صادق بود (جدول ۳). (Yi et al. (2013) به منظور برآورد رطوبت



شکل (۵): مقادیر رطوبت (الف)، آب قابل دسترس (ب) و آبدهی ویژه (ج) به کمک توابع انتقالی با ماهیت شبکه عصبی

درصدی شاخص RMSE به ترتیب در مورد رطوبت در نقاط FC، PWP و آب قابل دسترس در قیاس با نتایج تحقیق (Merdun et al. (2006) دارد. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از توابع انتقالی رگرسیون و شبکه عصبی، مقادیر شاخص RMSE در هر دو روش در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج شکل ۶ حکایت از عملکرد بهتر شبکه عصبی در قیاس با رگرسیون دارد. (Koekkoek and Bootink (1999) در تحقیقی مشابه عملکرد شبکه عصبی را در قیاس با رگرسیون بدون تفاوت معنی داری برتر گزارش کردند.

(Merdun et al. (2006) در تحقیقی مشابه و با استفاده از توابع با ماهیت شبکه عصبی مقادیر شاخص‌های مذکور را به ترتیب ۰/۰۰۶، ۰/۰۵۱ و ۰/۸۴ برای رطوبت در نقطه FC، ۰/۰۰۵، ۰/۰۲ و ۰/۹۵ برای رطوبت در نقطه PWP و ۰/۰۰۲، ۰/۰۴۴ و ۰/۷۵ برای آب قابل دسترس بدست آوردند. در تحقیق Yi et al. (2013) و (Merdun et al. (2006) نیز عملکرد توابع با ماهیت شبکه عصبی در پتانسیل‌های ماتریک کمتر، بهتر بوده که تایید کننده نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌باشد. ضمناً نتایج به دست آمده در این تحقیق حکایت از کاهش تقریبی ۷۸، ۶۵ و ۷۰



شکل (۶): ریشه میانگین مربعات خطا بمنظور برآورد رطوبت، آب قابل دسترس و آبدهی ویژه به کمک توابع پیشنهادی؛ MLR (رگرسیون) و ANN (شبکه عصبی)

رطوبت در نقطه رطوبتی FC بهبود یابد، که البته تایید آن نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد. نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج سایر تحقیقات نشان داد که هر دو تکنیک رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی توانستند در برآورد رطوبت خاک در نقاط پتانسیلی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی، آب قابل دسترس و آبدهی ویژه عملکرد مناسبی داشته باشند، اگرچه که عملکرد شبکه عصبی در قیاس با رگرسیون چندگانه خطی و بخصوص در برآورد رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی با کاهش خطای بیشتری همراه بود. اگرچه در این تحقیق سعی شد تا با بکارگیری پارامترهایی نظیر بعد فرکتالی خاک و مکش ورود هوا شرایط فیزیکی حاکم بر ذرات و نحوه آرایش آن‌ها لحاظ گردد با اینحال لازم است که رفتار این توابع بر روی مجموعه خاک‌های مستقلی مورد آزمایش قرار گیرند تا عملکرد آن‌ها تایید گردد. همچنین توصیه می‌شود که از پارامترهای بی بعد شده خصوصیات هیدرولیکی خاک در ورودی توابع انتقالی استفاده گردد تا با حذف اثرات مستقیم آنها که از یک نمونه به نمونه دیگر متغیر است، اثر منطقه‌ای بودن توابع انتقالی به کمترین مقدار ممکن برسد.

Pachepsky et al. (1996) بطور کلی عملکرد شبکه عصبی را در برآورد رطوبت خاک برتر از رگرسیون دانسته‌اند. این درحالی است که Merdun et al. (2006) عملکرد توابع با ماهیت رگرسیون را در برآورد خصوصیات هیدرولیکی مورد بحث بدون تفاوت معنی‌داری بهتر از عملکرد شبکه عصبی گزارش کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که انتخاب تکنیک شبکه عصبی به شرط آموزش صحیح شبکه و انتخاب مولفه‌های مناسب در ساختار این تکنیک منجر به کاهش ۶۳، ۲۸، ۴۳ و ۴۵ درصدی شاخص RMSE در قیاس با روش رگرسیون خواهد شد.

### نتیجه‌گیری

اثر منطقه‌ای بودن عملکرد توابع انتقالی در برآورد رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی، برآورد آب قابل دسترس و آبدهی ویژه با بکارگیری شش تابع انتقالی موجود و ارزیابی نتایج ضعیف آنها بر روی ۱۱۲ نمونه از خاکهای منتخب از شمال و شمال شرق کشورمان تایید شد. نتایج این تحقیق این فرضیه که توابع انتقالی برآورد کننده رطوبت خاک، در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر با خطای بیشتری همراه هستند را تایید نمود و البته در این تحقیق سعی شد تا با کاربرد خصوصیات نظیر میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، بعد فرکتالی خاک و مکش ورود هوا در ورودی توابع، عملکرد توابع بخصوص در برآورد

## منابع

- 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، سال دوم، شماره ۱، ص ۴۵-۵۵.
- قربانی دشتکی ش. و م. همایی. ۱۳۸۱. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیر اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، سال سوم، شماره ۱۲، ص ۱-۱۵.
- Acutis, M and M. Donatelli. 2003. SOILPAR 2.00, software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Agronomy*, 18:373-377.
- Borgesen C. D. and M. G. Schaap. 2005. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma*, 127:154-167.
- Botula Y. D., W. M. Cornelis, G. Baert and E. Van Ranst. 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management*, 111:1-10.
- Brahim N., M. Bernoux and T. Gallali. 2012. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. *Arid Environments*, 81:77-83.
- Brillante, L., B. Bois, O. Mathieu, V. Bichet, D. Michot and J. Leveque. 2014. Monitoring soil volume wetness in heterogeneous soils by electrical resistivity. A field-based pedotransfer function. *Journal of Hydrology*, 516: 56-66.
- Givi J., O. S. Prasher 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.
- Haghverdi A., W. M. Cornelis and B. Ghahraman. 2012. A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *Journal of Hydrology*, 442-443:46-54.
- Hernadi, H and A. Mako. 2014. Preliminary investigation to estimate soil NAPL retention using parametric pedotransfer functions. *International Agrophysics*, 28: 435-445.
- Kaihua, L., F. Xua, J. Zheng, Q. Zhu and G. Yang. 2014. Using different multimodel ensemble approaches to simulate soil moisture in a forest site with six traditional pedotransfer functions. *Environmental modelling and software*, 57: 27-32.
- Kamenickova, I. and L. Larisova. 2014. Using two pedotransfer functions to estimate soil moisture retention curves from one experimental site of south Moravia. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 62(3): 501-506.
- Khodaverdiloo, H., M. Homae, M. T. H. van Genuchten and S. Ghorbani Dashtaki. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- Koekkoek E. J. W., and H. Booltink. 1999. Neural network models to predict soil water retention. *European Soil Science*, 50:489-495.
- Liao K. H., S. H. Xu, J. C. Wu, S. H. Ji and Q. Lin. 2011. Assessing soil water retention characteristics and their spatial variability using pedotransfer functions. *Pedosphere*, 21:413-422.
- Liao, K., F. Xua, J. Zheng, Q. Zhu and G. Yang. 2014. Using different multimodel ensemble approaches to simulate soil moisture in a forest site with six traditional pedotransfer functions. 2014. *Environmental Modelling and Software*, 57: 27-32.
- Manyame C., C. L. Morgan, J. L. Heilman, D. Fatondji, B. Gerard and W. A. Payne. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141:407-415.
- Medina H., M. Tarawally, A. Valle and M. E. Ruiz. 2002. Estimating soil water retention curve in rhodic Ferralsols from basic soil data. *Geoderma*, 108:277-285.
- Merdun H. 2010. Alternative methods in the development of pedotransfer functions for soil hydraulic characteristics. *Eurasian Soil Science*, 43:62-71.

Merdun H., Ö. Cnar, R. Meral and M. Apan. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90:108-116.

Minasny B., A. B. McBratney and K. L. Bristow. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93:225-253.

Mohanty, M., N. K. Sinha, D. K. Painuli, K. K. Bandyopadhyay, K.M. Hati, K. Sammi Reddy and R.S. Chaudhary. 2015. Modelling soil water contents at field capacity and permanent wilting point using artificial neural network for Indian soils. *National Academy Science Letters*, 38(5): 373-377.

Nanko, K., S. Ugawa, S. Hashimoto, A. Imaya, M. Kobayashi, H. Sakai, S. Ishizuka, S. Miura, N. Tanaka, M. Takahashi and S. Kaneko. 2014. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*, 213: 36-45.

Nemes A and W. Rawls. 2006. Evaluation of different representations of the particle size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132:47-58.

Nemes A., M.G. Schaap and J.H.M. Wösten. 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1093-1102.

Nemes A., W.J. Rawls and Y.A. Pachepsky. 2006. Use of the nonparametric Nearest Neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70:327-336.

Ostovari, Y., K. Asgari and W. Cornelis. 2015. Performance evaluation of pedotransfer functions to predict field capacity and permanent wilting point using UNSODA and HYPRES datasets. *Arid Land Research and Management*, 29: 383-398.

Pachepsky Y. A., D. Timlin and G. Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Science Society of America Journal*, 60:727-733.

Rab, M. A., S. Chandra, P. D. Fisher, N. J. Robinson, M. Kitching, C. D. Aumann and M. Imhof. 2011. Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils. *Soil Research*, 49: 389-407.

Santra P and B. S. Das. 2008. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. *Geoderma*, 136:439-448.

Sarmadian F and R. T. Mehrjardi. 2008. Modeling of some soil properties using artificial neural network and multivariate regression in Gorgan province, north of Iran. *Global Environmental Research*, 2:30-35.

Schaap M. G., F. J. Leij and M. Th. van Genuchten. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251:163-176.

Shirazi M. A. and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of American Journal*, 48:142-147.

Tomasella J and M. G. Hodnett. 1998. Estimating soil water retention characteristic from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, 163:190-202.

Tyler S. W and S. W. Wheatcraft. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*, 26(5):1047-1054.

Vereecken H., M. Weynants, M. Javaux, Y. Pachepsky, M.G. Schaap and M.T.h. van Genuchten. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone Journal*, 9:1-26.

Wagner B., V. R. Tarnawski, V. Hennings, U. Muller, G. Wessolek and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedotransfer function for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102:275-297.

Walczak R. T., F. Moreno, C. Sławin'ski, E. Fernandez and J. L. Arrue. 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*, 329:527-533.

Wosten 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.

Wosten J. H. M., Y. Pachepsky and W. A. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251:123-150.

Yi X., G. Li and Y. Yin. 2013. Comparison of three methods to develop pedotransfer functions for the saturated water content and field water capacity in permafrost region. *Cold Regions Science and Technology*, 88:10-16.

Zolfaghari, Z., M. R. Mosaddeghi and S. Ayoubi. 2015. ANN-based pedotransfer and soil spatial prediction functions for predicting atterberg consistency limits and indices from easily available properties at the watershed scale in western Iran. *British Society of Soil Science, Soil Use and Management*, 1-13.

Schaap, M. G. and F. J. Leij. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 47: 37-42.



## Prediction of Some Soil Hydraulic Properties Using Pedotransfer Functions

Roozbeh Moazenzadeh<sup>1</sup>, Bijan Ghahraman<sup>2</sup>

### Abstract

Field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) are efficacious in determining net irrigation water depth. However, direct measurement of these properties is tedious, time consuming and costly especially on large scale. Soil pedotransfer functions (PTFs) as the indirect methods can replace by the direct methods. In this study, performance of the six available pedotransfer functions on FC and PWP moisture content predicting was evaluated on 112 soil samples that were collected from the north and northeast regions of Iran. The Root Mean Square Error (RMSE) values of mentioned available PTFs were changed between 0.05 to 0.17 and 0.03 to 0.13 in moisture prediction on FC and PWP points, respectively. Therefore new PTFs were developed by Multiple Linear Regression (MLR) and Artificial Neural Network (ANN) techniques based on soil properties (90 samples) and the results were validated on different soils (22 samples). The results showed that both MLR technique with assigning the RMSE values approximately 0.035, 0.01, 0.027 and 0.024 to predict soil moisture content on FC and PWP, total available water and specific yield and ANN technique with assigning the values approximately 0.013, 0.007, 0.015 and 0.013 to the same properties, evaluated in appropriate performance. The results also showed that using variables such as geometric mean and geometric standard deviation particle diameter, fractal dimension and air-entry suction, for the first one on input variables of PTFs, improved the accuracy of the results significantly, although accepting of this theory requires more studies.

**Keywords:** Available water, Fractal dimension, Moisture content, Specific yield, Validation.

1 - Assistant Professor, Department of Soil and Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Iran; [romo\\_sci@shahroodut.ac.ir](mailto:romo_sci@shahroodut.ac.ir), Corresponding Author

2 - Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran; [bijangh@um.ac.ir](mailto:bijangh@um.ac.ir)