

## کارایی مدل‌های برآورد دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در خاک

زهرا کاظمی<sup>1</sup>، محمدرضا نیشابوری، حسین بیات، شاهین اوستان و محمد مقدم

دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز؛ zkazemi2016@gmail.com

استاد دانشگاه تبریز؛ neyshmr@hotmail.com

استادیار دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان؛ hbayat2001@gmail.com

دانشیار دانشگاه تبریز؛ oustan@hotmail.com

استاد دانشگاه تبریز؛ mmoghaddam@tabrizu.ac.ir

دریافت: 92/8/28 و پذیرش: 93/5/21

### چکیده

دامنه‌ای از رطوبت حجمی خاک که در آن، محدودیت‌ها برای رشد گیاه در ارتباط با پتانسیل آب، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک در کمترین مقدار خود باشد، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) نامیده می‌شود. اندازه‌گیری LLWR به طور تجربی به هزینه و زمان زیادی نیاز دارد. به کارگیری توابع تبدیلی (PTF) می‌تواند بر آورد آن را تسریع کند. درباره صحت و قابلیت اعتماد تخمین PTF‌های توسعه یافته برای خصوصیات هیدرولیکی خاک از طریق شبکه عصبی مصنوعی (ANNs)، روش چندهدفی مدیریت گروهی داده‌ها (MGMDH) و رگرسیون چند متغیره خطی (MLR) اطلاعات متناقضی در دست است. این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی سه روش مذکور در تخمین مستقیم LLWR انجام گرفت. بدین منظور 188 نمونه دست نخورده برای تعیین منحنی نگهداری آب خاک، منحنی مقاومت خاک و نهایتاً ثابت‌های رطوبتی ( $\theta_{afp}$ ,  $\theta_{sr}$ ,  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{ppp}$ ) و نمونه‌های دست خورده برای اندازه‌گیری یازده ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک به کار گرفته شد. پس از محاسبه LLWR از رطوبت‌های حد بالا و حد پایین ( $LLWR_e$ ) یک بار دیگر نیز LLWR با به کارگیری سه روش مذکور مستقیماً ( $LLWR_d$ ) از خصوصیات خاک برآورد شد. صحت و قابلیت اعتماد تخمین با به کارگیری آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیار اطلاعات آکایک (AIC) و بهبود نسبی مورد بررسی قرار گرفت. روش ANNs از بالاترین صحت و قابلیت اعتماد تخمین برخوردار بود (RMSE پایین‌تر و AIC منفی‌تر). MGMDH و MLR در درجات بعدی قرار داشتند. معنی‌دار بودن تفاوت صحت و قابلیت اعتماد تخمین PTF‌های ایجاد شده با سه روش مختلف با به کارگیری AIC ارزیابی شد. تفاوت‌ها بین PTF‌های ایجاد شده با روش‌های ANNs و MGMDH از یک طرف و روش MLR از نظر آماری معنی‌دار بود، اما تفاوت بین ANNs با MGMDH فقط برای مرحله آموزش معنی‌دار شد. در بین سه روش مورد مطالعه، ANNs از بالاترین کارایی در برآورد مستقیم LLWR برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: تابع تبدیلی (PTF)، ثابت‌های رطوبتی، صحت تخمین، قابلیت اعتماد

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

## مقدمه

همکاران در سال 1994 بر خلاف توابع یاد شده علاوه بر اثر  $\Psi$ ، اثر چگالی ظاهری ( $D_b$ ) را نیز بر منحنی رطوبتی در قالب تابع توانی ارائه دادند.

مقاومت مکانیکی خاک (SR) عمدتاً توسط  $\theta$  و چگالی ظاهری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. رابطه بین SR،  $\theta$  و  $D_b$  با عنوان منحنی مقاومت خاک ( $SR^4$ ) در مطالعات بوسچر (1990)، داسیلوا و کی (1997) و داسیلوا و همکاران (1994) مورد استفاده قرار گرفته است. وضعیت تهویه‌ای خاک نیز می‌تواند به صورت تابعی از تخلخل تهویه‌ای توصیف شود و به طور مسلم بین تهویه و محتوای رطوبتی یک رابطه معکوس وجود دارد. گرابل و سیمر (1968) تخلخل تهویه‌ای 10 درصد را به عنوان حد بحرانی تخلخل تهویه‌ای مطرح کردند. اندازه‌گیری LLWR وقت‌گیر و گاهی پرهزینه است و استفاده از داده‌های زودیافت با به کارگیری توابع تبدیلی ( $PTF^5$ ) می‌تواند برآورد LLWR را تسریع و سهل نماید (داسیلوا و کی، 1997). دو روش متداول برای ایجاد توابع تبدیلی، روش‌های رگرسیون چندگانه ( $MLR^6$ ) و شبکه‌های عصبی مصنوعی ( $ANNs^7$ ) هستند. رگرسیون چندگانه مفهوم ساده‌تری دارد و سال‌ها به طور گسترده‌ای توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است (داسیلوا و کی، 1997؛ آگراوال و همکاران، 2004). مردان و همکاران (2006) تفاوت توابع تبدیلی توسعه یافته به دو روش MLR و ANN را از لحاظ صحت تخمین مقایسه کردند. نتایج نشان داد اگر چه مدل رگرسیونی متغیرهای نقطه‌ای و پارامتریک خصوصیات هیدرولیکی خاک را بهتر از ANN برآورد نمود، اما تفاوت‌ها از لحاظ آماری معنی‌دار نبود، با این حال ANN برای برآورد خصوصیات و توابع هیدرولیکی که اندازه‌گیری آنها زمان‌بر و خسته‌کننده است به عنوان یک ابزار قوی مورد توجه قرار گرفته است (پاچپسکی و همکاران، 1996؛ اسخاپ و همکاران، 1998). طبق یافته‌های اکثر محققین شبکه‌های عصبی مصنوعی بهتر از رگرسیون عمل می‌کنند (اسخاپ و همکاران، 1998، کوکوک و بولتینگ، 1999؛ اسکولوو و همکاران، 2011). کشاورزی و همکاران (2010) دو روش رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای توسعه توابع تبدیلی مناسب برای تخمین FC و PWP از خصوصیات سهل‌الوصول خاک نظیر درصد رس، سیلت، کربن آلی (OC)، نقطه اشباع (SP)، چگالی ظاهری ( $D_b$ )

محدوده  $LLWR^1$  دامنه‌ای از رطوبت در یک خاک است که در آن اثرات توأم تهویه، مقاومت مکانیکی و فراهمی آب برای رشد گیاه و عملکرد در قالب یک پارامتر و به صورت کمی بیان می‌شود (داسیلوا و همکاران، 1994؛ بنجامین و همکاران، 2003) و در دو دهه اخیر فوق‌العاده مورد توجه قرار گرفته است. به کارگیری LLWR به عنوان شاخص تولید محصول بالقوه (بنجامین و همکاران، 2003) و شاخص کیفیت ساختمان خاک (داسیلوا و همکاران، 1994؛ تورنا و همکاران، 1999) و در مقیاس مزرعه‌ای برای ارزیابی سیستم‌های مدیریتی پیشنهاد شده است (کی و همکاران، 2006). LLWR بر اساس مفهوم معرفی شده توسط لئی (1985) استوار است. یک دامنه گسترده LLWR نشان می‌دهد که خاک به فشارهای محیط (کمبود آب، محدودیت تهویه و مقاومت مکانیکی و ...) بیشتر مقاوم است و LLWR کوچکتر نشان دهنده آن است که گیاه از کمبود آب و مقاومت مکانیکی یا تهویه ضعیف بیشتر در معرض صدمه است و قابلیت تولید کمی دارد. LLWR از چهار ثابت رطوبتی خاک یعنی رطوبت نقطه پژمردگی دائم ( $\theta_{pwp}$ )، رطوبت ظرفیت مزرعه ( $\theta_{fc}$ )،  $\theta_{sr}$  و  $\theta_{afp}$  محاسبه می‌شود.  $\theta_{sr}$  و  $\theta_{afp}$  بالاترین و پایین‌ترین حد رطوبت در خاک است که در آن به ترتیب تهویه و مقاومت مکانیکی ( $SR^2$ ) برای رشد ریشه و جذب آب محدود کننده است. حد بالای LLWR،  $\theta_{afp}$  یا  $\theta_{fc}$  است بسته به اینکه از بین تهویه یا زهکشی سریع کدام یک برای قابلیت دسترسی آب توسط گیاه محدود کننده باشند. حد پایین LLWR بسته به اینکه پتانسیل آب خاک یا مقاومت مکانیکی بالا کدام یک برای جذب آب محدود کننده باشند  $\theta_{pwp}$  یا  $\theta_{sr}$  خواهد بود، پس برای محاسبه LLWR نیاز است که رابطه بین  $\theta$  و هر یک از متغیرهای پتانسیل آب، مقاومت مکانیکی و تهویه به دست آید (داسیلوا و کی، 1997). رابطه بین  $\theta$  و  $\Psi$  همان منحنی رطوبتی خاک ( $WRC^3$ ) است که با یکی از توابع بروکس و کوری (1964) یا ون گنوختن (1980) قابل توصیف می‌باشد. در محدوده  $\theta$  بالا تابع ون گنوختن مناسب‌تر است و توابع دیگری نظیر بروکس و کوری و فرم‌های تغییر شکل یافته آن مثل مدل کمپل (1974)، هاتسون و کاس (1987) می‌توانند به کار روند و عموماً برازش قابل قبولی در دامنه وسیعی از پتانسیل‌ها فراهم کنند (داسیلوا و کی، 1997). داسیلوا و

4. Soil resistance curve

5. Pedotransfer functions

6. Multivariate linear regression

7. Artificial neural networks

1. Least limiting water range

2. Soil resistance

3. Water release curve

## مواد و روش‌ها

## الف - تهیه نمونه‌های خاک و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی شیمیایی

در این پژوهش 188 نمونه خاک دست نخورده با دامنه گسترده از خصوصیات خاک با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری به قطر 5/64 و ارتفاع 4/07 سانتی متر از اطراف اهر و هوراند در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. نمونه‌برداری در مهر ماه انجام گرفت و محل‌های نمونه‌برداری کاربری‌های مختلف (شامل زراعت، باغ، مرتع، جنگل و زمین بایر) داشتند. چگالی ظاهری خاک در همان نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک از قبیل بافت، کربن آلی (OC)، کربنات کلسیم معادل (CCE)، اکسیدهای آزاد آهن و آلومینیوم به صورت آهن و آلومینیوم قابل استخراج با سترات بی‌کربنات دیتیونیت ( $Al_d$  و  $Fe_d$ ) و آهن و منگنز قابل استخراج با اگزالات آمونیوم ( $Mn_o$  و  $Fe_o$ )، نسبت سدیم قابل جذب (SAR) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) نمونه‌های دست خورده از همان محل تهیه شدند. تاکنون از بین خصوصیات خاک تنها اثر  $D_b$ ، OC و درصد رس (داسیلوا و کی، 1997) و اثر CCE (نصرتی، 1386) بر LLWR بررسی شده و اثر سایر خصوصیات به ویژه  $Al_d$ ،  $Fe_d$ ،  $Mn_o$ ، SAR و CEC بر LLWR مطالعه نشده است که گمان می‌رود بر LLWR مؤثر باشند. خاک‌ها طوری انتخاب شدند که از نظر ویژگی‌های مذکور و چگالی ظاهری در دامنه وسیع‌تری قرار گیرند تا اثر آنها بر LLWR به خوبی مشخص شود. اندازه‌گیری‌ها به روش‌های متداول آزمایشگاهی انجام گرفت (پیچ، 1982؛ کلات، 1986).

## ب - تعیین منحنی مشخصه آب خاک و منحنی مقاومت خاک

منحنی مشخصه رطوبتی خاک (WRC) با اندازه‌گیری رطوبت خاک در نمونه‌های دست نخورده پس از اشباع آنها در محلول 0/01 مولار  $CaCl_2$  و رساندن به تعادل در 7 مکش ماتریک 0.4، 10، 30، 100، 500 و 1500 کیلوپاسکال به دست آمد. رساندن نمونه‌ها به تعادل در مکش‌های 4 و 10 کیلوپاسکال (40 و 100 سانتی‌متر) با وسیله ستون آب آویزان و بقیه با دستگاه صفحه فشار صورت گرفت (دین و همکاران، 2002a, b). بلافاصله پس از توزین نمونه‌های دست نخورده مقاومت مکانیکی نیز با استفاده از دستگاه پترومتر اندازه‌گیری شد. رطوبت-های وزنی با محاسبه چگالی ظاهری به رطوبت‌های حجمی تبدیل شدند. از این داده‌ها برای تعیین ضرایب مدل منحنی رطوبتی (معادله 1) و منحنی مقاومت خاک

و کربنات کلسیم ( $CaCO_3$ ) به کار گرفتند. نتایج نشان داد مدل توسعه یافته با ANNs مقادیر FC و PWP را بهتر از مدل رگرسیونی برآورد نمود. تاکنون توابع تبدیلی متعددی توسط محققین مختلف برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش‌های MLR (داسیلوا و کی، 1997، وریخن و همکاران، 1989) ANNs، (پاچپسکی و همکاران، 1996؛ پاچپسکی و راولز، 1999) و مدیریت گروهی داده‌ها ( $GMDH^1$ ) (پاچپسکی و همکاران، 1998) ایجاد شده‌اند، اما در زمینه صحت و قابلیت اعتماد تخمین توابع تبدیلی ایجاد شده برای ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش‌های متعدد اطلاعات ضد و نقیضی وجود دارد (کوکوک و بولتینگ، 1999؛ مردان و همکاران، 2006). بیات و همکاران (2011) دریافتند که روش چند هدفی مدیریت گروهی داده‌ها ( $MGMDH_2$ ) در توسعه توابع تبدیلی نقطه‌ای بهتر از روش ANNs عمل نمود. مقادیر  $R_2$  و RMSE توابع ایجاد شده به روش  $MGMDH$  به ترتیب بالاتر و پایین‌تر از مدل‌های ANNs بود.

بر خلاف مدل‌های منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی یا حتی مقاومت مکانیکی خاک تاکنون هیچ تلاشی در جهت توسعه توابع تبدیلی برای برآورد LLWR از خصوصیات زود یافت خاک به روش‌های  $MGMDH$  و ANNs صورت نگرفته است تاکنون تنها مطالعات اندکی در زمینه تخمین ثابت‌های رطوبتی با به کارگیری مدل‌های رگرسیونی انجام گرفته است (داسیلوا و کی، 1997؛ نصرتی، 1386) و به علاوه در زمینه تخمین مستقیم LLWR از خصوصیات خاک تحقیقاتی انجام نیافته است. بنابراین:

این پژوهش با هدف برآورد مستقیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ( $LLWR_d$ ) از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متعدد خاک شامل بافت، کربن آلی،  $D_b$ ، کربنات کلسیم، SAR، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و اکسیدهای فلزی (تاکنون اثر اکسیدهای فلزی، SAR و CEC بر LLWR مورد بررسی قرار نگرفته است) با به کارگیری روش‌های  $MGMDH$ ، ANNs و MLR و تعیین کارایی روش‌های مورد مطالعه در برآورد  $LLWR_d$  با به کارگیری معیارهای صحت و قابلیت اعتماد تخمین از طریق مقایسه  $LLWR_d$  با مقادیر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت تجربی ( $LLWR_e$ ) که از طریق ثابت‌های رطوبتی محاسبه گردیده است، انجام شد.

1. Group method of data handling

2. Multi-objective group method of data handling

ضرایب، مقدار رطوبت خاک در مقاومت 2 مگاپاسکال (SR=2) با به کارگیری مدل بوسچر محاسبه شد. حال با در دست داشتن چهار ثابت رطوبتی ( $\theta_{pwp}$ ،  $\theta_{sr}$ ،  $\theta_{afp}$ ،  $\theta_{fc}$ ) برای هر نمونه خاک و با در نظر داشتن اینکه حد بالایی LLWR رطوبت خاک در مکش ماتریک 10 کیلوپاسکال یا در تخلخل تهویه‌ای 10 درصد (هر کدام کمتر بود) و حد پایینی آن، مقدار رطوبت خاک در مکش ماتریک 1500 کیلوپاسکال یا در مقاومت مکانیکی 2 مگاپاسکال (هر کدام بیشتر بود) می‌باشد (لئو و داسیلوا، 2004) مقدار LLWR برای تمامی 188 نمونه دست نخورده محاسبه شد این مقادیر به عنوان LLWR تجربی ( $LLWR_e$ ) و مرجع برای ارزیابی صحت مدل‌های برآوردکننده مد نظر قرار گرفتند.

### ج- برآورد مستقیم LLWR

برای تخمین مستقیم LLWR (که از این پس با  $LLWR_e$  نشان داده می‌شود) از یازده ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک (جدول 1) پس از تست نرمال بودن و استانداردسازی داده‌ها در محیط EXCEL 20 بار به طور تصادفی مرتب سازی شده و از مجموع 188 داده 125 تا برای آموزش و 63 تا برای اعتبار سنجی به کار گرفته شد. داده‌ها ابتدا 20 بار در محیط MGDMDH (یک برنامه نوشته شده در محیط MATLAB) برای برآورد  $LLWR_e$  به کار گرفته شدند پس از 20 بار تخمین، 5 سری داده‌ای که  $LLWR_e$  را با بالاترین صحت برآورد نمودند ( $R^2$  بالاتر و RMSE پایین‌تر) برای مدل‌سازی با روش‌های ANNs و MLR نیز به کار گرفته شد، تا کارایی سه روش مورد مطالعه در تخمین  $LLWR_e$  مورد مقایسه قرار گیرد. بدین ترتیب سه گروه از توابع تبدیلی ایجاد شدند (هر گروه شامل 5 تابع تبدیلی که با به کارگیری 5 سری داده ایجاد شدند). صحت و قابلیت اعتماد تخمین توابع ایجاد شده با به کارگیری آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE^1$ )، معیار اطلاعات آکایک ( $AIC^2$ ) (آکایک، 1974) و بهبود نسبی ( $RI^3$ ) و معنی‌داری تفاوت در صحت و قابلیت اعتماد تخمین با AIC (هوانگ و همکاران، 2002) ارزیابی شد. جزئیات نحوه ایجاد PTFها به سه روش مورد مطالعه در بخش‌های بعدی آورده شده است.

### د) ایجاد توابع تبدیلی

توابع تبدیلی در این مطالعه به سه روش زیر

ایجاد شد:

(معادله 3) استفاده گردید (داسیلوا و کی، 1997). در مجموع مقدار رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک در 188 سیلندر دست نخورده در 6 مکش ماتریک (4، 10، 30، 100، 500 و 1500 کیلوپاسکال) اندازه‌گیری شد. برای توصیف منحنی مشخصه آب خاک از مدل نمایی پیشنهاد شده توسط داسیلوا و همکاران (1994) به صورت زیر استفاده شد.

$$\theta = \exp(a + b.D_b). \psi^c \quad (1)$$

در این معادله  $\theta$  رطوبت حجمی خاک ( $cm^3/cm^3$ )،  $D_b$  چگالی ظاهری خاک ( $Mg/cm^3$ )،  $\Psi$  مکش ماتریک خاک برحسب MPa و  $\alpha$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب مدل هستند. مزیت استفاده از این مدل نسبت به مدل‌های دیگر مثل مدل ون‌گونوختن این است که این مدل چگالی ظاهری خاک را به طور مستقیم در مدل دخالت می‌دهد. برازش شکل نمایی این مدل بر داده‌های WRC تجربی با استفاده از نرم افزار Solver (لئو و داسیلوا، 2004) در EXCEL صورت گرفت و ضرایب برای هر خاک به طور جداگانه به دست آمد. دو ثابت رطوبتی  $\theta_{fc}$  و  $\theta_{pwp}$  با استفاده از معادله 1 با در نظر گرفتن مقادیر 10 و 1500 کیلو پاسکال به ترتیب برای FC و WP به دست آمد. داسیلوا و کی (1997) و داسیلوا و همکاران (1994) نیز از مکش 10 کیلو پاسکال برای تعیین  $\theta_{fc}$  استفاده کرده‌اند. رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای 10 درصد ( $\theta_{afp}$ ) از رابطه زیر به دست آمد (گرابل و سیمر، 1968).

$$\theta_{afp} = \theta_s - 0.1$$

که در این معادله  $\theta_s$  رطوبت حجمی اشباع خاک و  $\theta_{afp}$  مقدار رطوبت حجمی نظیر تخلخل تهویه‌ای 10 درصد است

داده‌های رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک با مدل نمایی بوسچر و همکاران (1990) به صورت زیر به کار رفت.

$$SR = d\theta^e D_b^f$$

در این رابطه SR مقاومت مکانیکی خاک برحسب مگاپاسکال،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک برحسب  $cm^3/cm^3$  و  $D_b$  چگالی ظاهری خاک برحسب مگاکرم بر متر مکعب می‌باشد،  $d$ ،  $e$  و  $f$  ضرایب مدل هستند. برازش مدل مذکور بر داده‌های تجربی توسط نرم افزار Solver در EXCEL انجام گرفت. پس از به دست آمدن

<sup>1</sup> Root mean square error

<sup>2</sup> Akaike information criterion

<sup>3</sup> Relative improvement

(7)

$$RI = (RMSE_2 - RMSE_1) / RMSE_2 \times 100$$

در مقایسه بین دو روش،  $RMSE_1$  و  $RMSE_2$  به ترتیب مجذور مربعات خطای میانگین بزرگتر و کوچکتر برای توابع تبدیلی توسعه یافته برای تخمین  $LLWR_d$  است. برای ارزیابی معنی‌داری تفاوت در صحت و قابلیت اعتماد تخمین توابع تبدیلی توسعه یافته و اینکه آیا این تفاوت‌ها می‌تواند به عنوان پیشرفت از یک PTF به PTF دیگر مد نظر قرار گیرد یا نه، معیار AIC به کار گرفته شد (معادله 8) (هوانگ و همکاران، 2002).

$$AIC^* = AIC_2 \times 0.05 + AIC_2 \quad (8)$$

در مقایسه بین دو متغیر وابسته تخمین زده شده با دو روش مختلف (برای مثال ANNs و MLR)  $AIC_2$  نشان دهنده مقدار آماره اطلاعات اکایک روشی است که دقت تخمین کمتری دارد (AIC کمتر منفی). اگر  $AIC^*$  حاصل در مقایسه با  $AIC_1$  (مقدار AIC روشی که صحت تخمین بالاتری دارد)، هنوز کمتر منفی باشد بیانگر آنست که افزایش صحت و قابلیت اطمینان تخمین از یک روش به روش دیگر از لحاظ آماری معنی‌دار است به عبارت دیگر بین دو روش از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار وجود دارد.

### نتایج و بحث

دامنه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک-های مورد بررسی در جدول 1 آورده شده است. Sand: درصد شن، Clay: درصد رس، CCE: کربنات کلسیم معادل، OC: درصد کربن آلی، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، SAR: نسبت جذب سدیم،  $D_b$ : چگالی ظاهری خاک،  $AL_d$  و  $Fe_d$ : آلومینیوم و آهن قابل استخراج با سیترات بی‌کربنات دیتینیت،  $Fe_0$  و  $Mn_0$ : آهن و منگنز قابل استخراج با اسید آمونیوم اگزالات.

خاک‌های مورد بررسی شامل 5 کلاس بافتی شن لومی، لوم‌رس‌شنی، لوم رسی، لوم و لوم شنی بودند. همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده است، دامنه تغییرات خصوصیات خاک‌های مورد بررسی، وسیع می‌باشد که ضریب تغییرات (CV) بالا خصوصاً در مورد SAR و  $Mn_0$  گواه بر این مطلب می‌باشند و نشان می‌دهد که توابع تبدیلی توسعه یافته می‌تواند نیز با اعتماد بالایی به منظور تخمین مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس بررسی انجام گرفته در نرم‌افزار SPSS بین یازده متغیر مستقل مورد بررسی هیچ‌گونه همبستگی داخلی وجود نداشت. نتایج برازش مدل منحنی رطوبتی داسیلوا و همکاران (1994) بر داده‌های WRC تجربی و مدل

در استفاده از روش MGMDH، نرم افزار MATLAB استفاده شد. یک مرور کامل از الگوریتم‌های MGMDH توسط آتشکاری و همکاران (2005) ارائه شده است. به طور خلاصه، در مسائل چند منظوره بهینه‌سازی، اهداف متعدد و یا بردار هدف وجود دارد که باید به طور همزمان بهینه‌سازی شود (به حداقل و یا حداکثر رسانده شوند). فرض بر این است که همه توابع هدف (بهینه‌سازی بر مبنای RMSE) باید بدون از دست دادن کلیت به حداقل برسد (آتشکاری و همکاران، 2005).

در برآورد  $LLWR_d$  از شبکه‌های عصبی مصنوعی از ویژگی‌های خاک، نرم‌افزار NeuroPath (مینانسی و براتنی، 2002) به کار گرفته شد. جزئیات ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در نرم‌افزار مذکور توسط دنیس و همکاران (1981) شرح داده شده است. داده‌های ورودی شامل یازده متغیر مستقل ( $X_{11}$  به  $X_{11}$ ) بود. در اجرای نرم‌افزار تعداد واحدهای پنهان، 4 bootstrap پنجاه و تعداد چرخش صد انتخاب شد.

برای برآورد  $LLWR_d$  از روش رگرسیون چند-متغیره خطی به صورت زیر با به کارگیری نرم افزار SPSS استفاده شد. (4)

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$$

در معادله مذکور  $y$  متغیر وابسته و  $x_1$  تا  $x_n$  یازده متغیر مستقل هستند (جدول 1). ضرایب رگرسیونی نیز در جدول 1 لیست شده‌اند.

### ه. معیارهای ارزیابی صحت و قابلیت اعتماد تخمین

معیارهای  $R^2$ ، RMSE، AIC و RI برای ارزیابی صحت و قابلیت اعتماد تخمین توابع تبدیلی ایجاد شده به کار گرفته شد (5)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_m - y_p)^2 / N}$$

(6)

$$AIC = N \ln \left[ \sum_{i=1}^N (y_m - y_p)^2 / N \right] + 2n_p$$

که در اینجا  $N$  نشان دهنده تعداد نمونه‌های (مشاهدات) به کار رفته برای تخمین متغیر وابسته (125 نمونه برای آموزش و 63 تا برای اعتبارسنجی)،  $y_m$  و  $y_p$  به ترتیب نمایانگر مقادیر  $LLWR_d$  و  $LLWR_d$  و  $n_p$  تعداد پارامترهای برآورد شده است.

آماره RI نیز برای نشان دادن بهبود نسبی تخمین از یک PTF به PTF دیگر محاسبه شد (ژانگ و همکاران، 1992).

توابع تبدیلی ایجاد شده به روش MGDH نیز از صحت و قابلیت اعتماد تخمین بالایی برخوردار بود اما در مقایسه با روش ANNs مقدار آن پایین‌تر است (جدول 2). این نتایج با یافته‌های بیات و همکاران (2008) که گزارش کردند روش MGDH در برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی بروکس و کوری (1964) دقیق‌تر از روش ANNs عمل نمود متناقض است. پاچپسکی و همکاران (1998)، پاچپسکی و راولز (1999) و آنگارو و همکاران (2005) همچنین گزارش کردند که توابع تبدیلی توسعه یافته به روش GMDH بهتر از PTF‌های ایجاد شده به روش ANNs عمل نمودند. آنها نتیجه گرفتند که روش GMDH برای شبیه‌سازی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ابزار قدرتمندتری است. آنگارو و همکاران (2005) همچنین دریافتند که برای برخی از مجموعه داده‌های اعتبارسنجی، PTF‌های ایجاد شده به روش ANNs بهتر از GMDH عمل نمودند.

یک جفت از توابع تبدیلی توسعه یافته برای مراحل آموزش و اعتبارسنجی LLWR<sub>h</sub> به روش MLR در جدول 3 آورده شده است (برای توضیحات علائم به جدول 1 مراجعه شود).

بوسچر و همکاران (1990) بر داده‌های منحنی مقاومت مکانیکی تجربی با استفاده از نرم افزار Solver نشان داد  $R^2$  مدل WRC برای تمامی خاک‌ها بیشتر از 0/952 بود که نشان می‌دهد مدل فوق توانایی بالایی برای توصیف WRC تجربی دارد و استفاده از مذکور به جای سایر مدل‌های WRC نظیر مدل ون‌گونختن منطقی و مستدل به نظر می‌رسد.  $R^2$  مدل SRC بوسچر و همکاران (1990) برای خاکهای مورد بررسی از 0/75 تا 0/1 متغیر بود و در 0/81 درصد خاکها مقدار آن بیشتر از 0/9 بود.

#### برآورد مستقیم LLWR از خصوصیات خاک

سه گروه از توابع تبدیلی برای تخمین مستقیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در خاک از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (LLWR<sub>h</sub>) بدون اندازه‌گیری چهار ضریب رطوبتی با به کارگیری روش‌های مذکور ایجاد شد.

بالاترین صحت و قابلیت اعتماد تخمین (مقدار  $R^2$  بیشتر، RMSE کمتر و مقدار آکایک بیشتر منفی) به - PTF‌های توسعه یافته به روش ANNs تعلق داشت ( $R^2$  مساوی 0/95 و 0/88، RMSE مساوی 0/0116 و 0/0236؛ AIC مساوی -1118/71 و -471/63 - به ترتیب برای مراحل آموزش و اعتبارسنجی LLWR<sub>h</sub>) (جدول 2).

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های بررسی شده

آماره‌ها ویژگی‌ها	حداکثر	حداقل	میانگین	ضریب تغییرات (%)
Mn <sub>o</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	1065/5	36/0	307/1	94/27
Al <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	867/0	167/0	510/1	40/54
Fe <sub>o</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	3357/4	289/8	1184/5	76/05
Fe <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	11166/8	2557/6	5146/1	44/0
D <sub>b</sub> (Mg m <sup>-3</sup> )	1/6	1/1	1/3	9/6
SAR (mmol <sub>c</sub> l <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	8/9	0/1	1/2	190/2
CEC (cmolc kg <sup>-1</sup> )	74/4	8/9	26/6	51/8
OC (%)	4/1	0	1/7	63/2
CCE (%)	30/4	2/5	14/5	53/4
Clay (%)	34/3	7/1	20/5	35/8
Sand	87/44	28/62	49/54	27/77

جدول 2- شاخص‌های صحت و قابلیت اعتماد تخمین برای LLWR<sub>d</sub> برآورد شده به روش‌های مختلف

روش شاخص‌ها	MGMDH	ANNs	MLR
R <sup>2</sup> (آموزش)	0/78	0/95	0/35
R <sup>2</sup> (اعتبارسنجی)	0/77	0/83	0/33
RMSE (آموزش)	0/0246	0/0116	0/041
RMSE (اعتبارسنجی)	0/0252	0/0236	0/040
AIC (آموزش)	-924/013	-1118/71	-796/102
AIC (اعتبارسنجی)	-462/133	-471/662	-399/004
روش‌های مورد مقایسه	ANNs با MGMDH	MLR با MGMDH	MLR با ANNs
RI روش‌های مورد مقایسه (آموزش) %	52/8	71/7	40/1
RI روش‌های مورد مقایسه (اعتبارسنجی) %	6/6	41/7	37/6

جدول 3- توابع تبدیلی ایجاد شده برای برآورد LLWR<sub>d</sub> به روش MLR در مراحل آموزش و اعتبارسنجی

R <sup>2</sup>	توابع تبدیلی ایجاد شده	روش
0/45	LLWR <sub>d</sub> = 0.132 - 0.031 D <sub>b</sub> + 0.016 Fe <sub>o</sub> - 0.009 SAR - 0.014 OC - 0.011 CEC	MLR (آموزش)
0/34	LLWR <sub>d</sub> = 0.139 - 0.032 D <sub>b</sub> - 0.016 Clay	MLR (اعتبارسنجی)

معنی‌دار نبود، اما رگرسیون پارامترهای هیدرولیکی خاک را بهتر از شبکه‌های عصبی مصنوعی پیش‌بینی نمود. به نظر می‌رسد که مدل‌های تخمین‌گر (ANNs, MGMDH, و MLR) ممکن است بسته به اینکه چه پارامتری را برآورد می‌کنند رفتارهای متفاوتی (به اصطلاح صحت و قابلیت اعتماد تخمین‌های متفاوتی) داشته باشند.

مقادیر RI محاسبه شده برای PTF‌های حاصل (جدول 2) نشان می‌دهد که کاربرد ANNs به جای MLR برآورد LLWR<sub>d</sub> را به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید (RI مساوی 71/7% و 41/7% به ترتیب برای مرحله آموزش و اعتبارسنجی). روش ANNs در مقایسه با MGMDH برآورد LLWR<sub>d</sub> را در مرحله آموزش 53% ولی برای مرحله اعتبارسنجی تنها 6% بهبود بخشید. مقادیر RI برای مقایسه بین MGMDH با MLR نشان داد که مشابه با ANN، MGMDH بهتر از MLR عمل نموده است (جدول 2). در واقع به کارگیری ANNs و MGMDH در مقایسه با MLR تخمین را به مقادیر قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده است. این نتایج با یافته‌های بیات و همکاران (2008) و اسکولوو و همکاران (2011) که گزارش کردند توابع تبدیلی توسعه یافته برای تخمین پارامترهای منحنی رطوبتی بر مبنای ANNs در مقایسه با توابع رگرسیونی عملکرد بهتری دارند هماهنگ است.

معنی‌داری تفاوت در صحت و قابلیت اعتماد تخمین توابع تبدیلی توسعه یافته به سه روش مورد مطالعه در این پژوهش با به کارگیری آماره AIC ارزیابی شد. با توجه به این آماره تفاوت در صحت تخمین بین PTF‌های ایجاد شده به سه روش مورد مطالعه، از

در هر دو مدل LLWR<sub>d</sub> با D<sub>b</sub> و درصد رس خاک همبستگی منفی نشان داد که هماهنگ با نتایج گزارش شده توسط داسیلوا و کی (1997) است. همبستگی LLWR<sub>d</sub> با SAR، CEC و OC نیز منفی و با Fe<sub>o</sub> مثبت است. صحت و قابلیت اعتماد تخمین PTF‌های ایجاد شده به روش MLR در مقایسه با دو روش ANNs و MGMDH پایین‌تر بود (جدول 2). (توجه شود که مقادیر R<sup>2</sup> مذکور در جدول 2 میانگین R<sup>2</sup> برای 5 تابع تبدیلی انتخابی در هر گروه است و مقادیر R<sup>2</sup> اشاره شده در جدول 3، مقدار میانگین نیست و برای یک تابع تبدیلی منفرد است)

یکی از مزایای استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با توابع رگرسیونی این است که آنها به یک مدل رگرسیونی فرضی، که داده‌های ورودی و خروجی را به هم مرتبط می‌کند نیاز ندارند و عموماً هم تخمین یک چنین رابطه‌ای مشکل است زیرا این مدل‌ها شناخته شده نیستند (اسخاپ و همکاران، 1998). مقایسه معیارهای RMSE و AIC نشان می‌دهد که در میان روش‌های مورد بررسی، ANNs دقیق‌ترین روش برآورد LLWR<sub>d</sub> است. این نتیجه با یافته‌های گزارش شده توسط چندین محقق (اسخاپ و همکاران، 1998؛ کوکوک و بولتینگ، 1999؛ سرمدیان و کشاورزی، 2010؛ اسکولوو و همکاران، 2011) که گزارش کردند شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور کلی بهتر از رگرسیون چند متغیره عمل می‌کنند هماهنگ، اما با نتایج مردان و همکاران (2006) متناقض است. آنها گزارش کردند تفاوت بین مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون از نظر آماری

(LLWR<sub>i</sub>) و هیچ تلاشی در رابطه با تخمین مستقیم آن از روی خصوصیات خاک و خصوصاً اکسیدهای فلزی صورت نگرفته است. داسیلوا و کی (1997) درصد رس خاک، OC و D<sub>b</sub> و فیدالسکی و همکاران (2010) OC و D<sub>b</sub> را برای ایجاد توابع تبدیلی مناسب برای WRC و SRC به کار گرفتند. در هر دو پژوهش اخیر مقادیر R<sup>2</sup> برای WRC و SRC به ترتیب مساوی 0/94 و 0/86 بود. نصرتی (1386) نیز LLWR را به طور غیر مستقیم از روی توابع تبدیلی ایجاد شده برای چهار ثابت رطوبتی  $\theta_{pwp}$ ،  $\theta_{fc}$ ،  $\theta_{sr}$ ،  $\theta_{afp}$  (با به کارگیری درصد رس خاک، OC، D<sub>b</sub> و CaCO<sub>3</sub>) برآورد نمود. مقادیر R<sup>2</sup> برای ثابت‌های مذکور به ترتیب مساوی 0/588، 0/578، 0/60 و 0/998 بود.

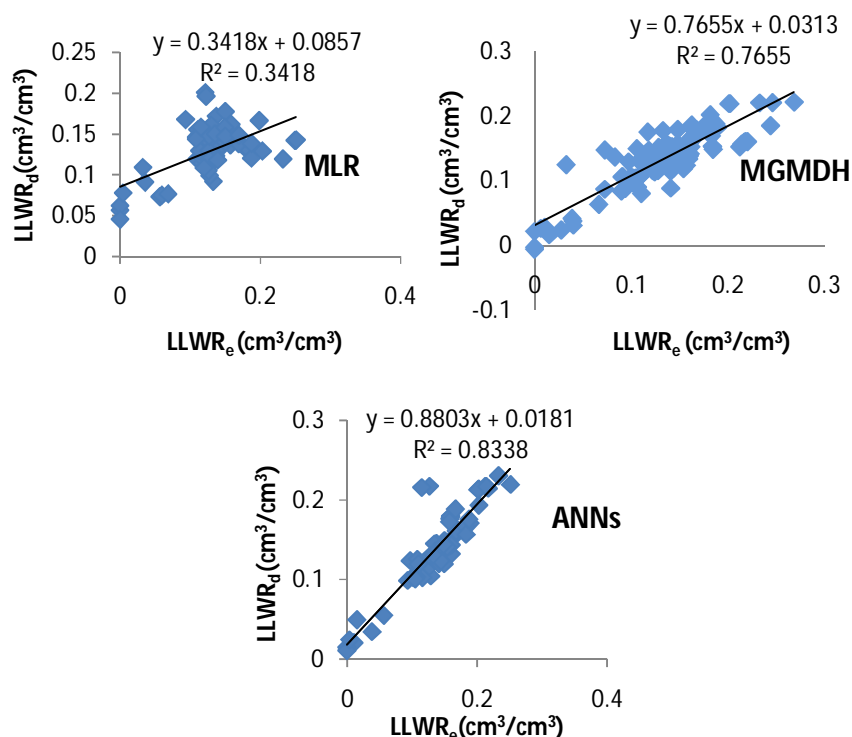
روند افزایش قابلیت اعتماد تخمین توابع تبدیلی ایجاد شده برای LLWR<sub>d</sub> به سه روش مورد مطالعه با رسم LLWR<sub>d</sub> در مقابل LLWR<sub>e</sub> در شکل‌های a تا c نشان داده شده است. با تغییر روش از MLR تا ANNs مقدار R<sup>2</sup> از 0/34 به 0/83 و مقدار ضریب رگرسیونی از 0/34 در روش MLR به 0/88 (حدوداً 1) در روش ANNs تغییر یافته است.

لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول 2). در مرحله اعتبارسنجی تفاوت بین توابع تبدیلی توسعه یافته به روش‌های ANNs و MGMDH با MLR از لحاظ آماری معنی‌دار بود اما تفاوت در قابلیت اعتماد تخمین ANNs با MGMDH معنی‌دار نبود، اگر چه ANNs بهتر از MGMDH عمل نمود.

بر اساس تمام آماره‌های مورد بحث در بالا MLR در مقایسه با ANNs و نسبت به MGMDH در برآورد LLWR<sub>d</sub> ضعیف عمل نمود. بیات و همکاران (2008) کارایی ANNs و MLR را در تخمین مقاومت خاک (SR) ارزیابی کردند. نتایج نشان داد ANNs در مقایسه با MLR، مقاومت خاک را با ضریب همبستگی بالاتر (R مساوی 0/85 در مقایسه با 0/70) و RMSE پایین‌تری برآورد نمود بنابراین ANNs به عنوان یک ابزار قوی در تخمین SR مورد توجه قرار گرفت.

جدول 3 نشان می‌دهد که در اکثر موارد، RMSE مرحله آموزش پایین‌تر از مرحله اعتبارسنجی بود (به استثناء روش MLR).

اکثر محققین (داسیلوا و همکاران، 1994؛ بوتلر و همکاران، 2008؛ نصرتی، 1386) LLWR را به طور غیر مستقیم از روی ثابت‌های رطوبتی تخمین زده‌اند



شکل 1 - مقایسه مقادیر LLWR<sub>e</sub> با LLWR<sub>d</sub> برآورد شده به روش‌های مختلف در مرحله اعتبارسنجی



## نتیجه‌گیری

قرار داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که LLWR ممکن است به طور رضایت‌بخش مستقیماً و به جای تعیین آن از داده‌های آزمایشگاهی زمان‌بر و بدون نیاز به تعیین چهار ثابت رطوبتی چه به صورت تجربی و چه از طریق توابع تبدیلی ایجاد شده از روی خصوصیات خاک، از داده‌های سهل‌الوصول خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد شود.

در این مطالعه از شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش MGDH و MLR برای توسعه توابع تبدیلی برای برآورد LLWR با استفاده از یازده ویژگی مختلف خاک به عنوان متغیرهای مستقل استفاده شد در میان سه روش مورد بررسی ANNs بالاترین صحت و قابلیت اعتماد تخمین را داشت، MGDH و MLR به ترتیب در درجات بعدی از لحاظ صحت و قابلیت اعتماد تخمین

## فهرست منابع:

1. نصرتی، ا.، 1386. دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در خاک و اثر عوامل مؤثر بر آن در برخی از خاک‌های استان همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بوعلی سینا. همدان. ایران.
2. Aggraval, P., A. Kumar Sing, U.K. Chopra, R. Tripathy, and K.K. Choudhary. 2004. Determination of least limiting water range of a sandy loam soil under bed and conventionally planted wheat. *J. Agr. Phys.* 4: 15-21
3. Akaike, H. 1974. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions 5 on Automatic Control AC.* 19: 716-723.
4. Atashkari, K., N. Nariman-Zadeh, A. Pilechi, A. Jamali, and X. Yao. 2005. Thermodynamic Pareto optimization of turbojet engines using multi-objective genetic algorithms. *Int. J. Therm. Sci.* 44: 1061-1071.
5. Bayat, H., M.R. Neyshabouri, K. Mohammadi, and N. Nariman- Zadeh, 2011. Estimating water retention with pedotransfer functions using multi-objective group method of data handling and ANNs. *Pedosphere* 21: 107-114.
6. Bayat, H., M.R. Neyshabouri, M.A. Hajabbasi, A.A. Mahboubi, and M.R. Mosaddeghi. 2008. Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turk J. Agric For.* 32: 425-433.
7. Beutler, A.N., J.F., Centurion, A.P., da Silva, M.A.P. da Cruz Centurion, C.L. Leonel, and A. da Silva Freddi. 2008. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesq. agropec. bras. Brasilia:* 43 (11): 1591-1600.
8. Benjamin, J.G., D.C. Nielsen, and M.F. Vigil. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma.* 116: 137- 148.
9. Brooks, R.H., and A.T. Corey. 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper No. 3. Colorado State University, Fort Collins, CO.
10. Buscher, W.J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water. *Trans. ASAE.* 33: 519- 524.
11. Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *J. Soil Sci.* 117: 311- 314.
12. Dane, J. H and Hopmans J. W. 2002a. Hanging water column. PP. 680-683. In: Dane, J. H., Topp G. C., (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
13. Dane, J. H and Hopmans J. W. 2002b. Pressure plate extractor. PP. 688-690. In: Dane, J. H., Topp, G.C., (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
14. Da Silva, A.P., B.D. Kay, and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775- 1781.

15. Da Silva, A.P., and B.D. Kay. 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877- 883.
16. Fidalski, J., C.A. Tormena, and A.P. da Silva. 2010. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 67 (n.4):448-453
17. Grable, A., and R. Siemer. 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. *SSSA. Proc.* 32: 180- 186.
18. Hutson, J.L., and A. Cass. 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* 38: 105- 113.
19. Hwang, S.I., K.P. Lee, D.S. Lee, and S. E. Powers. 2002. Models for estimating soil particle size distributions. *Soil SCI. Soc. Am. J.* 66: 1143-1150.
20. Kay, B.D., M.A Hajabbasi, J. Ying, and M. Tollenaar. 2006. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate development of maize. *Soil Till. Res.* 88: 42- 54.
21. Keshavarzi, A., F. Sarmadian, M. Sadeghnejad, and P. Pezeshki. 2010. Developing pedotransfer functions for estimating some soil properties using artificial neural network and multivariate regression approaches. *Pro Environment.* 3: 322 - 330
22. Klute, A. (ed). 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* 2<sup>nd</sup>. USA, Madison, WI.
23. Koekkoek, E.J.W., and H. Booltink. 1999. Neural network models to predict soil water retention. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 489-495.
24. Leao, T.P., and A.P. Da Silva. 2004. A simplified excel algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Agric. (Piraciaba, Braz.)*. 61: 649-654.
25. Letey, J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277- 294.
26. Merdun, H., O. Cinar, 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 Till. Res.* 90: 108–116.
27. Minasny, B., and A.B McBratney. 2002 Neural networks package for fitting – Pedotransfer functions, Technical note, Australian Centre for Precision Agriculture.
28. Pachepsky, Y.A., D. Timlin, and G. Varallyay, 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 727–733.
29. Pachepsky, Y.A., and W.J. Rawls. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1748-1757.
30. Pachepsky, Y.A., W.J. Rawls, D. Gimenez, and J.P.C. Watt. 1998. Use of soil penetration resistance and group of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil Till. Res.* 49: 117-126.
31. Page, A. L., (ed.). 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2. 2<sup>nd</sup>, Chemical Methods.* USA, Madison, WI.
32. Sarmadian, F., and A. Keshavarzi. 2010. Developing pedotransfer functions for estimating some soil properties using artificial neural network and multivariate regression approaches. *Int. j. Environ. Earth Sci.* 1: 1
33. Schaap, M.G., F.J. Leij, and M.Th. Van Genuchten. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 847–855.
34. Skalova, J., M. Cisty, and J. Bezak. 2011. Comparison of three regression models for determining water retention curves. *J. Hydrol. Hydromech.* 4: 275–284
35. Tormena, C.A, A.P. Da Silva, and P.L. Libardi. 1999. Soil physical quality of a Brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approaches. *Soil Till. Res.* 52: 223- 232.

36. Ungaro, F., C. Calzolari, and E. Busoni. 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.
37. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892- 898.
38. Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389–403.
39. Zhang, R., D.E. Myers, and A.W.W. Warrick. 1992. Estimation of spatial distribution of soil chemicals using pseudo

