

## تأثیر متغیرهای ورودی بر قابلیت برآورد مقدار رطوبت خاک از طریق مدل‌های مختلف منحنی نگهداشت آب خاک

عیسی ابراهیمی<sup>1</sup>، حسین بیات<sup>2</sup>، حمید زارع ابیانه<sup>3</sup>

(تاریخ دریافت: 1392/08/08 تاریخ پذیرش: 1393/01/19)

### چکیده

منحنی نگهداشت آب خاک یکی از ویژگی‌های اصلی خاک است و کاربردهای فراوانی دارد. اندازه‌گیری مستقیم این منحنی بسیار زمان بر و پرهزینه است. بنابراین، این منحنی اغلب با استفاده از روش‌های غیرمستقیم از جمله توابع انتقالی خاک برآورد می‌گردد. مدل‌های پرشماری برای کمی‌سازی این منحنی ارائه شده است و همچنین توابع انتقالی فراوانی برای پیش‌بینی این منحنی ایجاد گردیده است. با این وجود قابلیت برآورد مقدار رطوبت خاک با استفاده از سطوح متفاوت متغیرهای ورودی توابع انتقالی از طریق مدل‌های متفاوت منحنی نگهداشت آب خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش 75 نمونه خاک از استان گیلان جمع‌آوری و آزمایش‌های پایه روی آن‌ها انجام شد. آب خاک در 12 مکش (صفر، 1، 2، 5، 10، 25، 50، 100، 200، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال) اندازه‌گیری و ده مدل بر آن‌ها برازش داده شد. معادله پریر بر داده‌های توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها برازش شده و پارامترهای فراکتالی مربوطه به دست آمدند. پارامترهای فراکتالی ذرات و خاکدانه‌ها هر کدام در مراحل جداگانه به همراه رس، شن و جرم مخصوص ظاهری برای برآورد رطوبت از طریق مدل‌های مختلف استفاده شدند. در بین مدل‌های مورد مطالعه مدل سکی، فرمی و گاردنر با دقت بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های منحنی نگهداشت آب خاک برآورد شدند. بر خلاف انتظار دقت برآورد مدل‌های دکستر و دورنر پایین بود. نتایج تجزیه کلاستر نشان داد که مدل‌های دورنر و دکستر هر کدام در یک گروه جداگانه قرار گرفتند. مشاهده شد که تغییر برآوردگرها باعث تغییر در دقت برآورد رطوبت توسط مدل‌ها شده و جایگاه و رتبه‌بندی مدل‌ها در جداول را تغییر داد. در سطح اول مدل‌های فرمی و دکستر به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین دقت برآورد را داشتند. ولی در سطح دوم برآوردگرها مدل گاردنر و تانی به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین دقت برآورد را نشان دادند.

**واژه‌های کلیدی:** پارامترهای فراکتالی، تجزیه کلاستر، مدل‌های منحنی نگهداشت آب خاک

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا

2- استادیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا

پست الکترونیک: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

3- دانشیار گروه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا

## مقدمه

همکاران (Tomasella *et al.*, 2000) برای برآورد پارامترهای مدل ون گنوختن در تعدادی از خاک‌های مناطق گرمسیری برزیل، PTF هایی را ارائه نمودند که ریشه میانگین مربعات خطا در این توابع به مراتب کمتر از حالتی بود که از همین PTF ها در مناطق معتدل استفاده شده بود.

مدل های زیادی برای SWRC ارائه شده است از جمله مدل ون گنوختن، کمپل و دکستر. از سوی دیگر PTF های فراوانی با استفاده از متغیرهای ورودی مختلف برای پیش بینی این منحنی ایجاد گردیده است. روش های متفاوتی از جمله روش رگرسیونی و ANNs برای ایجاد - PTF ها مورد استفاده قرار گرفته اند. با این وجود قابلیت برآورد مقدار رطوبت خاک با استفاده از سطوح متفاوت متغیرهای ورودی PTF ها از طریق مدل های متفاوت SWRC با روش ANNs مورد بررسی قرار نگرفته است. یعنی این نکته که در ایجاد PTF ها با استفاده از ANNs برای برآورد رطوبت خاک کدام مدل SWRC استفاده شود بهتر است و اینکه آیا با تغییر متغیرهای ورودی، مدل SWRC که با استفاده از آن بالاترین دقت حاصل می شود تغییر می کند یا خیر به عنوان یک سؤال باقی مانده است. البته شاید علت عدم استفاده از برخی مدل های SWRC ناکارآمدی آن ها در مدل کردن رفتار خاک و یا پیچیده بودن آن ها از نظر ریاضی است که گنجاندن آن ها را در مدل های تبیین کننده رفتار خاک و یا نرم افزارها دشوار می کند. لذا برخی از مدل ها مثل ون گنوختن چون در این زمینه ها توفیق داشته اند بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند و توابع انتقالی هم بیشتر برای آنها ایجاد شده است. اما این که کدام مدل ها ناکارآمد هستند برای محققین مشخص نیست، چرا که تحقیق جامعی در این خصوص انجام نشده است. به طور مثال هیچ تحقیقی در زمینه تخمین مدل های سکی، دکستر و بولتزمن و برخی دیگر مدل ها دیده نشده است که کارآمدی یا ضعیف بودن آن ها را اثبات کند. بنابراین هدف این پژوهش بررسی اثر دو سطح متغیرهای ورودی بر قابلیت برآورد رطوبت از طریق مدل های مختلف SWRC با استفاده از ANNs بود.

منحنی نگهداشت آب خاک<sup>1</sup> (SWRC) یکی از خصوصیات اصلی خاک است و در مطالعات مربوط به آب قابل دسترس گیاه، نفوذ، زهکشی و فرایندهای بسیاری حائز اهمیت است (Foladmand & Hadipour, 2011). اندازه گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی از جمله SWRC در مزرعه یا آزمایشگاه زمان بر و پرهزینه بوده و ممکن است به خاطر تغییرات مکانی و زمانی، نتایج دقت بالایی نداشته باشد (Merdun *et al.*, 2006).

در دهه های اخیر اندازه گیری غیرمستقیم خصوصیات هیدرولیکی به طور گسترده انجام می شود که آسان و کم هزینه بوده و در زمان کوتاه تری صورت می گیرند (Wosten *et al.*, 1995; Minasny & McBratney, 2002; Minasny *et al.*, 2004). یکی از روش های غیر مستقیم استفاده از توابع انتقالی<sup>2</sup> (PTFs) خاک است. اگیار و همکاران (Agyare *et al.*, 2007) بیان کردند که PTF ها به روش های مختلف از جمله رگرسیون و شبکه های عصبی مصنوعی<sup>3</sup> (ANNs) و با استفاده از اطلاعات موجود و زود یافت خاک ایجاد می شوند. اکثر PTF ها برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک از داده های ساده و زود یافتی چون بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی استفاده می کنند (Haverkamp *et al.*, 2005; Rawls & Pachepsky, 2002). در پژوهش های دیگر نیز نشان داده شده است که درصد رس موجود در بافت خاک مهمترین عامل تاثیرگذار بر نقطه پژمردگی دائم است (Cazemier *et al.*, 2001; Haverkamp *et al.*, 2005; Jana *et al.*, 2007) پژوهشگران زیادی با استفاده از PTF ها پارامترهای مدل ون گنوختن را بدست آورده اند (Wosten *et al.*, 1995; Pachepsky *et al.*, 1996; Koekoek & Booltink, 1999; Mayr & Jarvis, 1999; Tomasella *et al.*, 2000).

آریا و پاریس (Arya & Paris, 1981) به کمک توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری، توزیع خلل و فرج خاک را مدل سازی نموده و سپس بر مبنای آن SWRC را پیش بینی نمودند. توماسلا و هودنت (Tomasella & Hodnett, 1998) اثر منطقه ای بودن خصوصیات PTF ها را با ارزیابی عملکرد ضعیف توابع ایجاد شده برای مناطق معتدل در نواحی گرمسیری، نشان دادند. توماسلا و

1- Soil water retention curve

2- Pedotransfer functions

3- Artificial neural networks

$$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta_s}{\theta}\right)^\lambda \quad (2)$$

مدل ون گنوختن (van Genuchten, 1980) یکی از رایج ترین مدل ها برای توصیف SWRC است. زیرا شکل سیگموئیدی و پیوسته ای از منحنی را برآورد می کند. از مزایای این مدل می توان انعطاف پذیری بالا و قابلیت برازش بر خاک های متفاوت را نام برد. همچنین پارامترهای این مدل مفهوم فیزیکی دارند.

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

### تئوری تحقیق

مدل گاردنر (Gardner, 1956) از اولین مدل های تحلیلی برای توصیف SWRC با چهار پارامتر است و حالت پیوسته ای از منحنی را ارائه می کند.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right) \quad (1)$$

پارامتر مدل ها در جدول شماره 1 معرفی شده اند. کمپل (Campbell, 1974) مدل سه پارامتری را ارائه نمود که مکش نقطه ورود هوا به خاک را یک نقطه ناگهانی فرض کرده است. در حالیکه در خاک های ریز بافت این نقطه تدریجی است.

جدول 1- پارامتر مدل های منحنی نگهداشت آب خاک و واحدهای آنها

Table 1- The parameters of the SWRC models and their units

Definition	تعریف	واحد	پارامتر Parameter
Residual water content	رطوبت باقیمانده	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\theta_r$
Saturated water content	رطوبت اشباع	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\theta_s$
Matric suction	مکش خاک	kPa	$\Psi$
Fitting parameter is related to the air entry value	پارامتر برازش و در ارتباط با مکش ورود هوا به خاک	1/ kPa	$\alpha$ گاردنر (Gardner)
Air entry value	مکش ورود هوا به خاک	kPa	$\Psi_e$ کمپل (Campbell)
Slop of SWRC	شیب SWRC	(-)	$\lambda$ کمپل (Campbell)
Fitting parameter is related to air entry value	پارامتر برازش و در ارتباط با مکش ورود هوا به خاک است	1/ kPa	$\alpha$ ون گنوختن (van Genuchten)
Pore size distribution index	شاخص توزیع اندازه منافذ خاک	(-)	n ون گنوختن (van Genuchten)
Parameter is related to the asymmetry of the model	پارامتر مرتبط با تقارن مدل	(-)	m ون گنوختن (van Genuchten)
Equal to the soil suction when effective degree of saturation is equal to 0.5	برابر با مکش خاک در حالتی است که درجه اشباع موثر برابر با 0/5 باشد.	cm	$\alpha$ فرمی (Fremi)
Pore size distribution index	شاخص توزیع اندازه منافذ خاک	(-)	n فردلاند-زینگ (Fredlund-Xing)

ادامه جدول 1- پارامتر مدل‌های منحنی نگهداشت آب خاک و واحدهای آن  
Continues of Table 1- The parameters of the SWRC models and their units

Definition	تعریف	واحد	پارامتر Parameter
Parameter is related to the asymmetry of the model	پارامتر مرتبط با تقارن مدل	(-)	m فردلاند-زینگ (Fredlund-Xing)
Is related to the air entry value	مرتبط با مکش ورود هوا	kPa	$\alpha$ فردلاند-زینگ (Fredlund-Xing)
Soil suction in residual condition	مکش خاک در رطوبت باقیمانده	kPa	$\Psi_r$ فردلاند-زینگ (Fredlund-Xing)
Residual water content	رطوبت باقیمانده در خاک	gr/gr	c دکستر (Dexter)
Proportional to matrix pore space	پارامتر مربوط به منافذ توده خاک	gr/gr	$A_1$ دکستر (Dexter)
Proportional to structural pore space	پارامتر مربوط به منافذ ساختمانی خاک	gr/gr	$A_2$ دکستر (Dexter)
Emptying of the matrix pore space	مکشی که در آن منافذ توده خاک شروع به تخلیه می‌کنند	kPa	$\Psi_1$ دکستر (Dexter)
Emptying of the structural pore space	مکشی که در آن منافذ ساختمانی خاک شروع به تخلیه می‌کنند	kPa	$\Psi_2$ دکستر (Dexter)
Gravimetric water content	بیانگر رطوبت جرمی خاک	gr/gr	w دکستر (Dexter)
Weighting factor	فاکتور وزنی	(-)	Wi سکی و دورنر (Durner and Seki)
Effective saturation	اشباع موثر	(%)	Se سکی (Seki)
Complementary error function	تابع توزیع نرمال تکمیلی	(-)	Q(x) سکی (Seki)
Fitting parameter	پارامتر برازشی	(-)	$\sigma_i$ سکی (Seki)
Number of peaks	تعداد نمای منحنی	(-)	K سکی (Seki)
Surface tension	کشش سطحی	dyne/cm	$\gamma$ سکی (Seki)
Contact angle	زاویه تماس	درجه	$\beta$ سکی (Seki)
Water density	چگالی آب	gr/cm <sup>3</sup>	$\rho_w$ سکی (Seki)
Gravity acceleration	شتاب ثقل	cm/s <sup>2</sup>	g سکی (Seki)
Pore radius	شعاع منافذ	میکرو متر	r سکی (Seki)
The same as those in the van Genuchten	مشابه پارامتر همسان در مدل ون-گنوختن	(-)	m و n دورنر (Durner)
Fitting parameter	پارامتر برازشی	(-)	$\sigma_i$ دورنر (Durner)

باعث افزایش نقاط حداقل موضعی در هنگام برازش منحنی می‌شوند و نمی‌توان اثر دو پارامتر بر منحنی را از هم تفکیک کرد. این موضوع باعث سختی برازش منحنی می‌شود (Sillers et al., 2001).

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{\alpha - \psi}{\alpha - n}\right) \exp\left(-\frac{\alpha - \psi}{\alpha - n}\right) \quad (4)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp\left(\frac{\alpha - \psi}{n}\right) \quad (5)$$

مدل تحلیلی تانی (Tani, 1982) دارای چهار پارامتر برازشی است که بر موقعیت و شکل منحنی اثر دارند و نمی‌توان اثر هر پارامتر را به صورت مجزا از هم تشخیص داد. به همین علت برازش آن مشکل است. ولی انعطاف پذیری آن بالا است و یک منحنی پیوسته‌ای را ارائه می‌دهد (Sillers et al., 2001).

مک‌کی و بامب (McKee & Bumb, 1984) یک مدل نمایی با چهار پارامتر برای SWRC ارائه کردند که به نام مدل بولتزمن معروف شد. عیب مدل بولتزمن در این است که پارامترهای آن بر شکل و موقعیت منحنی اثر دارند و

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i Q \left[ \frac{\ln\left(\frac{\psi}{\psi_{mi}}\right)}{\sigma_i} \right]$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (9)$$

$$\psi_m = \frac{A}{r_m}$$

$$A = \frac{2\gamma \cos \beta}{\rho_w g}$$

$\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $\beta$  زاویه تماس آب،  $\gamma$  کشش سطحی،  $r$  شعاع منافذ و  $g$  شتاب ثقلی می‌باشد. براساس (Brutsaert, 1966) مقدار  $A$  را برابر با  $0/149 \text{ cm}^2$  در نظر گرفت. همچنین مقدار  $\gamma$  نیز به صورت ثابت  $72/75 \text{ dyne/cm}$  در نظر گرفته می‌شود.

دکستر و همکاران (Dexter et al., 2008) بر پایه تخلخل چهار جزئی خاک، مدل خود را ارائه کردند. این مدل برای شن‌های خوب دانه‌بندی شده مناسب نیست. زیرا دامنه مکش و توزیع اندازه منافذ آنها بسیار کم است. البته این مشکل برای خاک‌های کشاورزی غالباً وجود ندارد.

$$w = c + A_1 \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_2}\right) \quad (10)$$

### مواد و روش‌ها

#### نمونه برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

75 نمونه خاک به صورت دست خورده و دست نخورده از استان گیلان جمع‌آوری شدند. توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها به روش هیدرومتر در 9 زمان (0/5، 1، 3، 10، 30، 60، 90، 120 و 1440 دقیقه) و سری الک خشک در پنج قطر (1، 0/5، 0/25، 0/15، 0/05 میلی‌متر) بدست آمد (Gee & Or, 2002). بر اساس روش جی و اور (Gee & Or, 2002) برای بدست آوردن مجموع رس و سیلت از قرائت‌های 30 و 60 ثانیه و برای به‌دست آوردن جزء رس از قرائت‌های 1/5 و 24 ساعت استفاده شد. روابط مربوطه در زیر آورده شده است.

$$\%(\text{silt} + \text{clay}) = P_{30\mu\text{m}} = m \ln(50 / X_{60}) + P_{60} \quad (11)$$

$$m = (P_{30} - P_{60}) / \ln(X_{30} / X_{60})$$

$$\% \text{clay} = P_{2\mu\text{m}} = m \ln(2 / X_{24}) + P_{24} \quad (12)$$

$$m = (P_{1.5} - P_{24}) / \ln(X_{1.5} / X_{24})$$

مک‌کی و بامب (McKee & Bumb, 1987) یک مدل نمایی دیگر به نام مدل فرمی ارائه کردند که از مدل بولتزمن ساده‌تر و انعطاف پذیرتر بوده و یک منحنی پیوسته را ارائه می‌کند.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{n}\right)} \right) \quad (6)$$

فردلان و زینگ (Fredlund & Xing, 1994) یک مدل پنج پارامتری ارائه کردند که شباهت زیادی به مدل ون‌گنوختن دارد و بر دامنه وسیعی از مکش‌ها قابل برازش است.

$$\theta = \theta_s \left( 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right) \left[ \frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad (7)$$

تمام مدل‌های نام برده در بالا تک‌نمایی<sup>1</sup> هستند. اما دورنر و سکی مدل‌های دو نمایی<sup>2</sup> پیشنهاد کردند. این مدل‌ها بر پایه توزیع ناهمسان منافذ خاک پایه‌ریزی شده‌اند. برای بیان تعریف مدل‌های تک‌نمایی و دو نمایی، سکی (Seki, 2007) این گونه بیان کرد که خاک‌هایی که دارای خاکدانه هستند دو نوع توزیع اندازه منافذ داشته و در نمودار نیز دارای دو پیک (قله) هستند؛ توزیع اندازه منافذ درشت که در بین خاکدانه‌ها است و توزیع اندازه منافذ ریز که در درون خاکدانه‌ها است. بنابراین مدل‌های SWRC که فقط یک نوع توزیع اندازه منافذ را در نظر می‌گیرند را تک‌نمایی و مدل‌هایی که هر دو نوع توزیع اندازه منافذ را مینا قرار می‌دهند را دو نمایی می‌گویند. دورنر (Durner, 1994) برای بیان مدل خود از مدل ون-گنوختن به عنوان مدل پایه استفاده کرد.

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_i \psi)^{n_i}} \right]^{m_i} \quad (8)$$

$$(0 < w_i < 1, \sum w_i = 1)$$

مدل سکی (Seki, 2007) بر اساس مدل توزیع لوگ‌نرمال اندازه منافذ خاک استوار است.

1- Unimodal  
2- Bimodal

$$\% \text{ silt} = \%(\text{silt} + \text{clay}) - \% \text{ clay} \quad (13)$$

$$\% \text{ sand} = 100 - \%(\text{silt} + \text{clay}) \quad (14)$$

در روابط فوق  $P_{24}$ ،  $P_{1.5}$ ،  $P_{60}$ ،  $P_{30}$ ،  $P_{50\mu\text{m}}$ ،  $P_{2\mu\text{m}}$  به ترتیب درصد تجمعی ذرات مربوط به 2 میکرومتر، 50 میکرومتر، قرائت 30 ثانیه، قرائت 60 ثانیه، قرائت 1/5 ساعت و قرائت 24 ساعت می‌باشند.  $X_{24}$  و  $X_{1.5}$ ،  $X_{60}$ ،  $X_{30}$  به ترتیب قطر محاسبه شده برای زمان‌های 30 ثانیه، 60 ثانیه، 1/5 ساعت و 24 ساعت می‌باشند.

برای بدست آوردن توزیع اندازه خاکدانه‌ها همانند روش توزیع اندازه ذرات عمل شد. با این تفاوت که از محلول کالگون استفاده نشد و به جای الک خشک از الک تر استفاده شد (Millan et al., 2007). برای بدست آوردن SWRC، رطوبت در مکش‌های صفر، 1، 2 و 5 کیلوپاسکال با استفاده از جعبه شن<sup>1</sup> و در مکش‌های 10، 25، 50، 100، 200، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری<sup>2</sup> (Dane & Jan, 2002) اندازه‌گیری شد. برای بدست آوردن جرم مخصوص ظاهری از روش استوانه استفاده شد (Grossman & Reinsch, 2002).

برای برازش مدل ون‌گونختن از نرم افزار RETC (van Genuchten et al., 1991)، برای برازش مدل‌های سکی و دورنر از برنامه نوشته شده توسط سکی (Seki, 2007)، برای برازش مدل‌های گاردنر و بولتزمن از DataFit9 و برای برازش مدل‌های تانی، کمپل، دکستر و فرمی نیز از ابزار Solver در برنامه Excel 2010 استفاده شد.

### فرآیند پیش‌بینی

برای بدست آوردن پارامترهای فراکتالی جهت استفاده از آن‌ها به‌عنوان برآوردگر، معادله پریر و همکاران، (Perrier et al., 1999) بر داده‌های اندازه‌گیری شده توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها برازش شده و مقادیر سه پارامتر فراکتالی برای هر کدام از توزیع‌ها به‌دست آمد. معادله پریر و همکاران، (Perrier et al., 1999) به صورت زیر می‌باشد.

$$m(x \leq x_i) = (\alpha^{D-3})(L^{D-3})x_i^{3-D} \quad (15)$$

$m(x \leq x_i)$  درصد تجمعی جرم خاک،  $\alpha$  نسبت تشابه<sup>31</sup>،  $L$  اندازه آغازگر<sup>2</sup>،  $x$  قطر ذرات و  $D$  بعد فراکتالی می‌باشد.

پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات با اندیس PSD و پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها با اندیس agg نشان داده شدند.

برای فرایند پیش‌بینی ابتدا معادلات SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش شد و مقدار ضرایب برای هر معادله بدست آمد. در مرحله بعد کلیه متغیرهای ورودی (شن، رس و جرم مخصوص و پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات ( $D_{\text{PSD}}$ ،  $L_{\text{PSD}}$  و  $\alpha_{\text{PSD}}$ ) و خاکدانه‌ها ( $D_{\text{agg}}$  و  $L_{\text{agg}}$ ) و ضرایب مدل‌های SWRC از نظر نرمال بودن بررسی شدند. متغیرهایی که توزیع نرمال نداشتند تبدیل نرمال بر روی آن‌ها صورت گرفت (جدول 2). سپس همه متغیرها استاندارد شدند. برای فرآیند برآورد 50% از داده‌ها برای آموزش و 50% باقیمانده نیز برای آزمون به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. سپس از دو سطح ورودی برای برآورد ضرایب مدل‌های SWRC با استفاده از ANNs استفاده شد.

به طور کلی برای اجرای شبکه‌های عصبی مصنوعی هر چقدر تعداد داده بیشتر باشد مفیدتر است. اما بیکر و الیسن (Baker & Ellison, 2008) گزارش کردند که اگر تعداد داده‌ها کم باشد می‌توان از شبکه‌های عصبی مصنوعی مرکب<sup>3</sup> به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده نموده و مدل‌های پایدارتری ایجاد کرد. بنابراین، چون تعداد داده‌ها در این تحقیق کم بود، از شبکه‌های عصبی مصنوعی مرکب برای ایجاد توابع استفاده شد. در شبکه‌های عصبی مصنوعی مرکب مدل‌سازی با استفاده از چندین نوع شبکه با ساختارهای متفاوت ایجاد می‌شود و در نهایت نتایج همه آن‌ها ترکیب می‌گردد.

در این پژوهش از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه (MLPs) و توابع پایه شعاعی (RBF) جهت ایجاد مدل‌های PTF منحنی رطوبتی استفاده شد. شبکه‌های مذکور دارای سه لایه ورودی، میانی و خروجی بودند و از توابع فعال‌سازی Sine، Tanh، Logistic، Gaussian، Exponential و Identity در لایه‌های میانی و خروجی استفاده شد. تعداد سلول‌ها در لایه میانی بین 3 تا 12 بود.

1-Sand box  
2-Pressure plate

3- Artificial neural network ensembles

$$RMSE = \left[ \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta_{pre} - \theta_{meas})^2 d\psi \right]^{0.5} \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\theta_{meas} - \theta_{pre})^2}{\sum (\theta_{meas} - \theta_{mean})^2} \quad (17)$$

$$AIC = N \ln \left( \frac{\sum (\theta_{pre} - \theta_{meas})^2}{N} \right) + 2q \quad (18)$$

### نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری متغیرهای ورودی در جدول 3 نشان داده شده است. میانگین مقادیر رس و شن نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب 33 و 16 درصد بود. مقدار جرم مخصوص ظاهری این خاک‌ها به طور متوسط برابر با 1/29 گرم بر سانتی متر مکعب بود. ویژگی‌های آماری پارامترهای فراکتالی برای توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها نیز نشان داده شده است.

نتایج مدل‌ها در دو بخش آموزش و آزمون برای سطح اول (بر اساس توزیع اندازه ذرات خاک) و دوم (بر اساس توزیع اندازه خاکدانه‌های خاک) ورودی‌ها به ترتیب در جدول 4 و 5 نشان داده شده‌اند. در این جداول مدل‌ها بر حسب میانگین IRMSE مرحله آزمون از کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند.

تحت شرایطی که از ورودی‌های سطح اول استفاده شد (جدول 4) مدل چهار پارامتری فرمی با بالاترین دقت در بین سایر مدل‌ها برآورد شد. مدل فرمی که یک مدل ساده‌تر و انعطاف پذیرتر و حالت توسعه یافته مدل بولتزن است دارای نتایج مناسبی می‌باشد که این نتایج با گزارشات مک‌کی و بامب (McKee & Bumb, 1987) مطابقت دارد. بیات و همکاران (Bayat et al., 2013) نیز دو مدل فرمی و بولتزن را از نظر دقت برازش با هم مقایسه نموده و بیان کردند که تفاوت معنی‌داری بین این دو مدل وجود ندارد.

• متغیرهای ورودی در سطح اول: رس، شن، جرم مخصوص ظاهری و پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک ( $L_{PSD}$  و  $D_{PSD}$ ,  $\alpha_{PSD}$ )

• متغیرهای ورودی در سطح دوم: رس، شن، جرم مخصوص ظاهری و پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها ( $L_{agg}$  و  $D_{agg}$ ,  $\alpha_{agg}$ )

در مرحله بعد مقدار پیش‌بینی شده برای هر ضریب را در معادله مربوطه قرار داده و SWRC برآوردی برای هر مدل به دست آمد. سپس SWRC برازش شده با SWRC برآوردی به صورت منحنی به منحنی مقایسه و آماره‌های انتگرال ریشه میانگین مربعات خطا (IRMSE)، معیار اطلاعات اکایک (AIC) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) محاسبه شدند.

مدل‌های بروکس-کوری (Brooks & Corey, 1964)، گرنوالت-گرنیت (Groenevelt & Grant, 2004) و لوگ نرمال کازوگی (Kosugi, 1994) به دلیل خطا در انجام برازش‌ها حذف شدند. در برآورد پارامترهای این مدل‌ها مقادیری که برای آماره‌های ارزیابی بدست آمد بسیار بالا بود و پارامترها دارای مقادیر منطقی نبودند. در واقع این مدل‌ها بر داده‌های SWRC نمونه‌های خاک برازش نشدند. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel 2010، برای نرمال‌سازی اطلاعات و بدست آوردن نمودارهای جعبه‌ای از نرم افزار Minitab16 و برای انجام تجزیه کلاستر از نرم افزار SPSS16 استفاده شد.

معیارهای سنجش مدل‌ها در معادلات 16 تا 18 نشان داده شده است که در این معادلات  $\theta_{pre}$ ،  $\theta_{meas}$  و  $\theta_{mean}$  به ترتیب نشان‌دهنده رطوبت پیش‌بینی شده، رطوبت اندازه‌گیری شده و میانگین رطوبت می‌باشند.  $q$  تعداد ضرایب مدل و  $N$  تعداد نقاط اندازه‌گیری شده رطوبت برای هر خاک می‌باشند.

جدول 2- روابط استفاده شده برای نرمالسازی برآوردگرها

Table 2- The use relations to normalize estimators

Transformation	رابطه نرمال سازی	Variable	متغیر
Sand <sup>0.5</sup>	(شن) <sup>0.5</sup>	Sand	شن
Bulk density <sup>2</sup>	(جرم مخصوص ظاهری) <sup>2</sup>	Bulk density	جرم مخصوص ظاهری

جدول 3- ویژگی‌های آماری متغیرهای ورودی

Table 3- Statistical characteristics of the input variables

		L <sub>agg</sub>	D <sub>agg</sub>	$\alpha_{agg}$	L <sub>PSD</sub>	D <sub>PSD</sub>	$\alpha_{PSD}$	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	شن (%) Sand	رس (%) Clay
Min	حداقل	0.65	2.71	0.65	0.63	2.73	0.63	0.73	1	13
Max	حداکثر	2.09	2.95	2.09	1.23	2.93	1.23	1.70	59	58
Mean	میانگین	1.17	2.81	1.17	0.79	2.86	0.79	1.29	16	33
SD	انحراف استاندارد	0.21	0.70	0.20	0.09	0.04	0.09	0.24	10	11

کردند هماهنگ است. بر خلاف انتظار، مدل دکستر که یک مدل دو نمایی و پنج پارامتری است (Dexter *et al.*, 2008) بطور ضعیفی برآورد شد. همچنین انتظار می‌رفت که مدل دورنر نیز با دقت مناسبی برآورد شود، اما با وجود دو نمایی بودن معادله آن نتایج برآورد رضایت بخش نبود. شاید نوع خاک‌های مطالعه شده در این تحقیق از عوامل مؤثر بر نتایج حاصله باشند. چون بر اساس گزارش دواتگر و همکاران (Davatgar *et al.*, 2006) اسمکتایت کانی غالب در خاک‌های استان گیلان است که یک رس 2:1 با رفتارهای متفاوت می‌باشد. بنابراین، در این زمینه نیاز به تحقیقات بیشتر بر روی خاک‌های متفاوت می‌باشد.

مدل فرمی بر اساس آماره AIC مرحله آزمون نیز کمترین خطا را داشت و بعد از آن به ترتیب مدل‌های تانی و سکی قرار گرفتند که جایگاه این دو مدل بر اساس آماره IRMSE عکس بود. ولی نکته اصلی این است که سه مدل اول و سه مدل آخر که به ترتیب بالاترین و ضعیف‌ترین دقت برآورد را داشتند، بر اساس هر دو آماره یکسان بودند.

در استفاده از سطح دوم متغیرهای ورودی یعنی متغیرهای ساختمانی مدل گاردنر با بالاترین دقت برآورد شد. مدل سکی نیز با دقت بالایی برآورد گردید (جدول 5). مدل فرمی که با سطح اول متغیرهای ورودی (یعنی متغیرهای بافت خاک) بالاترین دقت برآورد را داشت، با سطح دوم متغیرهای ورودی (یعنی متغیرهای ساختمانی)

بعد از مدل فرمی، مدل سکی قرار گرفت که این مدل از نظر معیارهای مورد مطالعه با دقت مناسبی برآورد شد و به خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده تطابق داشت. دقت بالای مدل سکی در حالتی که از اطلاعات توزیع اندازه ذرات استفاده شده است را می‌توان به همبستگی پارامترهای این مدل با برآوردگرها نسبت داد.

پارامترهای مدل سکی همبستگی قوی‌تر و بیشتری با ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات نسبت به توزیع اندازه خاکدانه‌ها از خود نشان دادند (داده‌ها نشان داده نشده است). یافته‌های حاصل از این پژوهش در زمینه برتری مدل سکی نسبت به مدل دورنر با مطالعه‌ای که سکی (Seki, 2007) بر روی قابلیت برآورد این دو مدل انجام داد هماهنگ است و این محقق نیز نشان داد که مدل سکی نسبت به مدل دورنر نتایج بهتری دارد. همچنین بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2013) نیز قابلیت برآورد دو مدل سکی و دورنر را مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل سکی دارای دقت بالاتری است. احتمالاً از دیگر دلایل نتایج مناسب مدل سکی، ارتباط مستقیم پارامترهای آن با توزیع لوگ نرمال اندازه منافذ خاک است (Seki, 2007). شاید همبستگی پارامترهای ورودی با ضرایب مدل سکی از دیگر دلایل نتیجه حاصله باشد.

مدل کمپل نسبت به مدل ون‌گنوختن دارای دقت برآورد بالاتری بود که با یافته‌های بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2013) که قابلیت برآورد مدل‌های متعدد را مقایسه



نتایج آن ضعیف شده و دقت برآورد آن کاهش یافت. با این وجود در مقایسه با مدل بولتزمن که شبیه‌ترین مدل به آن است با دقت بالاتری برآورد گردید.

جدول 4- دقت تخمین رطوبت از طریق مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی بر اساس سطح اول ورودی

Table 4- The accuracy of the estimation of water content through different SWRC models for the first input level.

Model	آزمون Testing			آموزش Training			
	مدل	AIC	R <sup>2</sup>	IRMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	AIC	R <sup>2</sup>	IRMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Fremi	فرمی	-1355	0.930	0.095	-1269	0.921	0.095
Seki	سکی	-1107	0.828	0.098	-1296	0.900	0.079
Tani	تانی	-1261	0.889	0.106	-1279	0.905	0.088
Gardner	گاردنر	-746	0.949	0.147	-1723	0.939	0.069
Boltzman	بولتزمن	-1026	0.967	0.209	-1273	0.961	0.182
Fredlund-Xing	فردلاند-زینگ	-1079	0.902	0.224	-1288	0.904	0.175
Campbell	کمپل	-876	0.956	0.273	-690	0.952	0.359
van Genuchten	ون‌گنوختن	-624	0.914	0.311	-743	0.911	0.239
Durner	دورنر	-346	0.767	0.347	-449	0.772	0.261
Dexter	دکستر	-341	0.806	0.625	-321	0.868	0.552

مدل ون‌گنوختن بسیار ساده است. در هر دو سطح متغیرهای ورودی مدل ون‌گنوختن با وجود این که یکی از پرکاربردترین مدل‌های SWRC است اما با دقت بالایی برآورد نشد و در سطح پایینی از دقت قرار گرفت. این نتیجه نشان می‌دهد در صورتیکه نیاز به برآورد مدل SWRC با استفاده از پارامترهای سهل‌الوصول برای خاک‌هایی با بافت متوسط تا سنگین باشد، بهتر است از مدل‌هایی غیر از مدل ون‌گنوختن بهره‌گیری شود. البته این نکته در خاک‌های مختلف نیاز به تحقیق بیشتری دارد.

در سطح دوم متغیرهای ورودی نیز سه مدل که بالاترین دقت تخمین را بر اساس آماره AIC مرحله آزمون داشتند کاملاً منطبق با آماره IRMSE بودند. سه مدل آخر نیز که ضعیف‌ترین دقت تخمین را بر اساس آماره AIC مرحله آزمون داشتند منطبق با آماره IRMSE بودند، هر چند که ترتیب آن‌ها متفاوت بود.

با دقت در رتبه‌بندی دقت برآورد مدل‌ها بر اساس ورودی‌های توزیع اندازه ذرات خاک (سطح اول) و توزیع اندازه خاکدانه‌های خاک (سطح دوم) (جدول 4 و 5) مشخص می‌گردد که نوع متغیرهای ورودی (مربوط به

مدل تانی که یک مدل چهار پارامتری است و انعطاف‌پذیری بالایی دارد و یک منحنی پیوسته‌ای را ارائه می‌دهد (Sillers *et al.*, 2001) با سطح اول متغیرهای ورودی دقت برآورد بالایی داشت (رتبه سوم) اما با سطح دوم متغیرهای ورودی دقت برآورد ضعیفی از خود نشان داد و به‌عنوان آخرین مدل طبقه‌بندی شد.

نتایج این جدول نشان می‌دهد که مدل کمپل در مقایسه با مدل ون‌گنوختن در بخش آزمون دارای دقت مناسبتری است اما در بخش آموزش تفاوت چندانی بین این دو مدل مشاهده نمی‌شود. در همین راستا مانیام و همکاران (Manyame *et al.*, 2007) قابلیت برآورد دو مدل ون‌گنوختن و کمپل را در خاک‌های درشت بافت نیچریه مقایسه کردند و دریافتند که مدل کمپل نسبت به مدل ون‌گنوختن نتایج بهتری داشت. بافت خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق برخلاف خاک‌های مورد استفاده در تحقیق مانیام و همکاران (Manyame *et al.*, 2007) است و غالباً دارای بافت متوسط تا سنگین هستند. اما با وجود این اختلاف مشاهده می‌شود که مدل کمپل با دقت بالاتری نسبت به مدل ون‌گنوختن برآورد شد. مدل کمپل یک مدل سه پارامتری است و معادله آن در مقایسه با

بین سایر مدل‌ها نتایج متوسطی داشته است اما در سطح دوم که از توزیع اندازه خاکدانه‌ها استفاده شده است رتبه-بندی آن افزایش یافته و در بالاترین سطح در بین مدل‌ها قرار گرفت. بیشترین تأثیر تغییر متغیر ورودی را در مدل تانی می‌توان مشاهده کرد که در دو سطح تفاوت بسیار زیادی در دقت برآورد از خود نشان داد.

بافت باشند یا ساختمان خاک) دارای برهمکنش با نوع مدل SWRC در برآورد رطوبت خاک با استفاده از ANNs می‌باشند. یعنی با تغییر نوع متغیرهای ورودی دقت برآورد رطوبت از طریق مدل‌های SWRC تغییر می‌کند. بنابراین برای ایجاد بهترین برآورد برای رطوبت خاک بهتر است انتخاب نوع مدل با توجه به ورودی‌های موجود انجام شود. به طوریکه مشاهده می‌شود مدل گاردنر در سطح اول در

جدول 5- دقت تخمین رطوبت از طریق مدل‌های مختلف SWRC براساس سطح دوم متغیرهای ورودی

Table 5- The accuracy of the estimation of water content through different SWRC models for the second input level

Model	آزمون Testing			آموزش Training			
	مدل	AIC	R <sup>2</sup>	IRMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	AIC	R <sup>2</sup>	IRMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Gardner	گاردنر	-1710	0.970	0.084	-1554	0.917	0.083
Seki	سکی	-1549	0.934	0.089	-1848	0.961	0.060
Fremi	فرمی	-1320	0.919	0.096	-1454	0.935	0.073
Fredlund-Xing	فردلاند-زینگ	-1128	0.864	0.190	-1113	0.880	0.179
Campbell	کمپل	-1152	0.978	0.197	-1087	0.967	0.216
Boltzman	بولتزمن	-1006	0.958	0.220	-1161	0.960	0.176
van Genuchten	ون‌گنوختن	-722	0.928	0.232	-776	0.937	0.217
Durner	دورنر	-195	0.669	0.293	-565	0.667	0.287
Dexter	دکستر	-634	0.917	0.367	-571	0.938	0.372
Tani	تانی	-291	0.660	0.590	-269	0.579	0.614

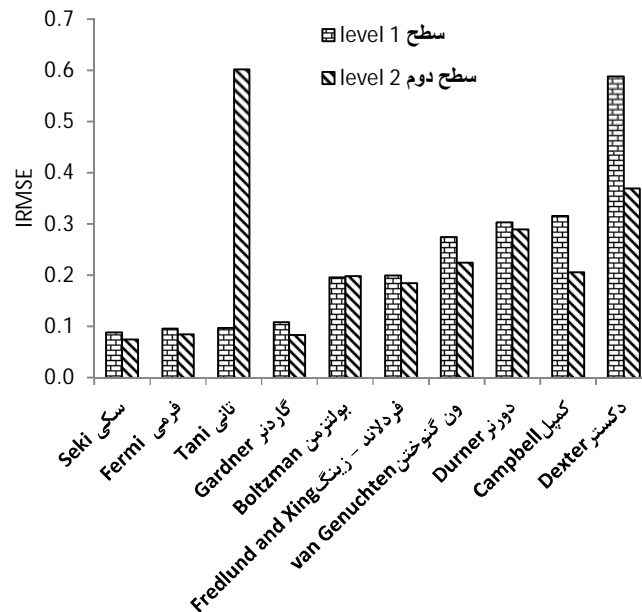
هر دو سطح با دقت پایینی برآورد شد. هرچند سطح دوم متغیرهای ورودی نتایج بهتری داشت. مدل کمپل از نظر معیار IRMSE در سطح متوسطی از دقت نسبت به دیگر مدل‌ها قرار گرفت. اما میانگین R<sup>2</sup> آن برای سطح اول و دوم به ترتیب برابر با 0/954 و 0/972 بود که در بین دیگر مدل‌ها دقت پایینی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل کمپل با نتایج نبی زاده و بیگی هرچگانی (Nabizadeh & Beigi Harchegani, 2011) مطابقت دارد. شاید یکی از دلایل عملکرد نسبتاً ضعیف مدل کمپل در مقایسه با مدل‌های گاردنر، سکی و فرمی سه پارامتری بودن آن باشد. همچنین این مدل مکش نقطه‌ی ورود هوا به خاک را یک نقطه‌ی ناگهانی فرض کرده است. در حالیکه در خاک‌های ریز بافت این نقطه تدریجی است (Campbell, 1974). بوچان و همکاران (Buchan et al., 1993) بیان کردند که با افزایش تعداد پارامترهای مدل سهولت استفاده از مدل کاهش می‌یابد. بنابراین بایستی

میانگین مقادیر IRMSE مراحل آموزش و آزمون هر مدل برای دو سطح متغیرهای ورودی در شکل 1 مقایسه شده است. تفاوت این شکل با جداول 4 و 5 در این است که در اینجا تأثیر سطح متغیرهای ورودی مقایسه شده است. نکته مهم در این شکل عملکرد متفاوت مدل تانی در دو سطح ورودی است. این مدل در سطح اول با نتایج دقیق‌تری برآورد شد. اما با سطح دوم متغیرهای ورودی میانگین IRMSE به شدت افزایش یافت، به طوری که یکی از ضعیف‌ترین نتایج حاصل شد. اغلب مدل‌ها تقریباً در هر دو سطح متغیرهای ورودی نتایج نزدیکی داشتند، به استثنای مدل دکستر که در این مدل نیز اختلاف بین دو سطح بالا بود. اما این اختلاف به اندازه اختلاف دقت برآورد با سطوح متفاوت در مدل تانی نیست. در مدل‌های سکی، فرمی و گاردنر نتایج دو سطح بسیار نزدیک هستند و سطح دوم نتایج مناسب‌تری از سطح اول داشت. همان گونه که در جداول 4 و 5 نشان داده شد، مدل دکستر در

افزایش نقاط حداقل موضعی در هنگام برازش منحنی می‌شوند و نمی‌توان اثر دو پارامتر بر منحنی را از هم تفکیک کرد. این موضوع باعث سختی برازش منحنی می‌شود (Sillers et al., 2001). مدل بولتزمن یک منحنی پیوسته را برآورد نمی‌کند.

بین دقت مدل و سهولت استفاده از مدل یک تعادلی را برقرار نمود.

شاید یکی از دلایلی که باعث شده است مدل بولتزمن در سطح متوسطی از دقت قرار گیرد این باشد که پارامترهای آن بر شکل و موقعیت منحنی اثر دارند و باعث



شکل 1- مقایسه مدل‌ها بر اساس میانگین IRMSE مراحل آموزش و آزمون برای دو سطح متغیرهای ورودی

Fig. 1- Comparing the models for the two input levels according to the average of the IRMSE of the training and testing steps

شدند. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج بیات و همکاران (Bayat et al., 2013) در زمینه بررسی قابلیت برازش مدل‌ها هماهنگ است. مدل‌های دکستر و دورنر نیز علی‌رغم داشتن ضعیف‌ترین دقت برآورد به علت تفاوت زیاد با همدیگر هر کدام در یک کلاس قرار گرفتند. مدل‌های کمپل و ون گنوختن که هر دو از مدل‌های نسبتاً قدیمی هستند نیز در یک کلاس قرار گرفتند.

در نمودار سطح دوم متغیرهای ورودی مدل‌های کمپل، بولتزمن، فردلانند-زینگ و ون گنوختن در یک گروه قرار گرفتند. مدل‌های گاردنر، سکی و فرمی نیز دارای دقت‌های نزدیکی بوده و در یک گروه قرار گرفتند. مدل‌های دکستر، دورنر و تانی نیز علی‌رغم داشتن ضعیف‌ترین دقت برآورد به علت تفاوت زیاد با همدیگر هر کدام در یک کلاس قرار گرفتند. مدل فردلانند-زینگ مدلی پنج پارامتری است که شباهت زیادی به مدل ون گنوختن دارد و بر دامنه وسیعی از مکش‌ها قابل برازش است

تجزیه کلاستر برای گروه‌بندی مدل‌ها از نظر دقت برآورد با استفاده از آماره IRMSE در دو سطح متغیرهای ورودی به کار برده شد. برای رسم نمودارها از میانگین آموزش و آزمون استفاده شده است. تجزیه کلاستر یک تکنیک برای کلاس‌بندی اطلاعات است و هدف این تقسیم‌بندی قرار دادن مدل‌های مشابه و نزدیک در یک کلاس یا کلاستر است. تعداد کلاسترها بستگی به تفاوت گروه‌ها دارد. هر چه قدر این تفاوت‌ها بیشتر باشد تعداد کلاسترهای ایجاد شده نیز بیشتر خواهد بود (Bezdek & Pal, 1992; Bezdek et al., 1999; Hoppner et al., 1999) همانگونه که مشخص است در هر دو شکل با خط قرمز مرز کلاس‌ها عدد 4/5 در نظر گرفته شد.

بر اساس تجزیه کلاستر برای متغیرهای ورودی سطح اول مدل‌های گاردنر، فرمی و بولتزمن دارای دقت نزدیکی بوده و در یک گروه قرار گرفتند. مدل‌های تانی، فردلانند و زینگ و سکی نیز دارای دقت برآورد مشابه بوده و هم‌گروه

مدل‌های تانی و گاردنر دارای میانگین کمتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشند که در نتایج جداول سطح اول نیز نشان داده شده است. مدل دکستر در نقطه مقابل مدل گاردنر قرار دارد و دارای کمترین دقت بود. خلوصی و همکاران (Khlosi *et al.*, 2008) نیز از این نمودار برای نمایش پراکندگی و دقت مدل‌ها استفاده کردند. در این مطالعه مدل کمپل دارای نتایج تقریباً متمرکزی در مقادیر IRMSE است اما در مطالعه خلوصی و همکاران (Khlosi *et al.*, 2008) مدل کمپل دارای داده پرت زیادی بوده است.

نمودار جعبه‌ای برای سطح دوم متغیرهای ورودی نیز در زیر نمایش داده شده است (شکل 2 ب). در این حالت مدل گاردنر دارای بیشترین دقت برآورد بود. اما دارای داده‌های خارج از دامنه بود که این داده‌ها اثر منفی در نتایج داشتند. اکثر مدل‌ها در سطح دوم متغیرهای ورودی دارای داده‌های پرت در نتایج برآورد بودند. مدل سکی به مدل گاردنر بسیار نزدیک بود که در نتایج حاصل از تجزیه کلاستر نیز این دو مدل از نظر دقت به هم نزدیک بوده و در یک گروه قرار گرفتند. در این حالت می‌توان تمرکز در IRMSE نتایج حاصل از مدل سکی را به خوبی مشاهده کرد که برتری مدل سکی در مقایسه با مدل گاردنر را نشان می‌دهد.

(Fredlund & Xing, 1994) و مشاهده می‌شود که در نمودار سطح دوم متغیرهای ورودی این دو مدل در یک کلاس قرار گرفته‌اند.

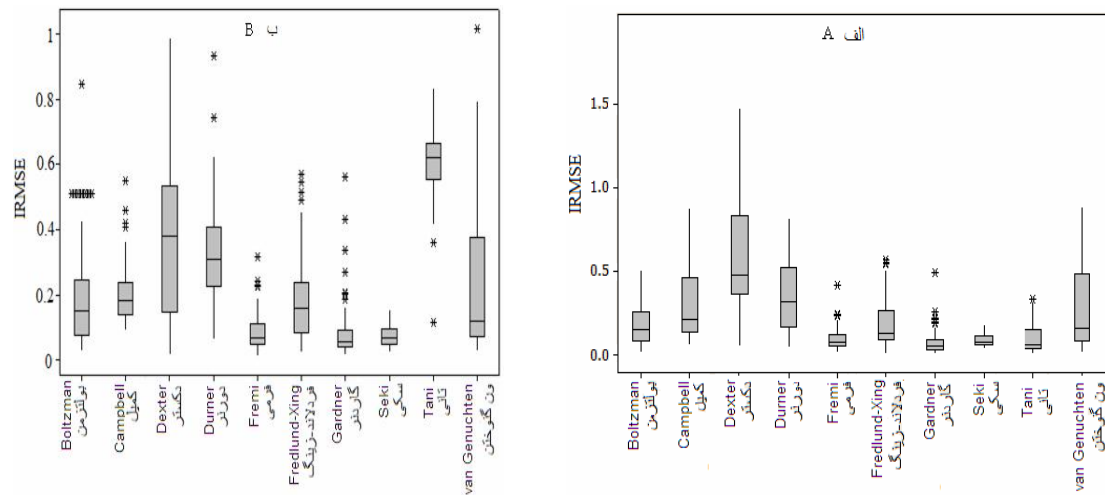
بنابراین نتایج تجزیه کلاستر نیز مؤید این نکته است که نوع متغیرهای ورودی دارای برهمکنش با نوع مدل SWRC در برآورد رطوبت خاک با استفاده از ANNs بوده و باعث تغییر کامل گروه‌بندی مدل‌ها از نظر دقت برآورد گردید. مشاهده می‌شود که مدل‌های سکی و فردلاندر-زینگ در سطح اول در یک کلاس اما در سطح دوم در کلاس‌های متفاوت قرار گرفتند. این نتیجه بیانگر این موضوع است که تغییر متغیر باعث افزایش تفاوت در بین این دو مدل شده است. در مورد سطح اول در رتبه‌بندی مدل‌های کمپل و ون‌گنوختن نسبت به سطح دوم تغییراتی رخ داده است (جداول 4 و 5) اما در کلاس‌بندی مجدد مشاهده گردید که این دو مدل در یک کلاس قرار دارند و تغییر متغیر باعث تغییر کلاس این دو مدل نشده است.

نمودار جعبه‌ای یک روش مرسوم برای نشان دادن پنج آماره مهم در یک گراف است که این آماره‌ها شامل میانه، حداقل، حداکثر، چهارک اول و سوم است. هر نمودار دارای یک مستطیل است که تمرکز اطلاعات در آن نشان داده می‌شود، ضلع پایینی بیانگر چهارک<sup>1</sup> اول بوده و بدین مفهوم است که 25% داده‌ها از این مقدار کوچکتر هستند و ضلع بالای مستطیل بیانگر چهارک سوم است و نشان می‌دهد که 75% داده‌ها از آن کوچکتر هستند. هر نمودار دارای دو بال است که از مرکز چهارک‌های اول و سوم عبور کرده است و به ترتیب بال پایین<sup>2</sup> و بال بالا<sup>3</sup> نامیده می‌شوند. با استفاده از این نمودار می‌توان از جداول طولانی جلوگیری کرد و مشخصات آماری بیشتری را در یک نمودار نشان داد (Tukey, 1977). در این نمودار همچنین می‌توان داده‌های پرت را نیز تشخیص داد که با علامت ستاره نشان داده می‌شوند. انتهای دو بال نشان دهنده مقادیر حداکثر و حداقل و داخل مستطیل نیز با یک خط مقدار میانه نمایش داده شده است (Frigge *et al.*, 1989). نمودار جعبه‌ای برای مدل‌ها برای هر دو سطح متغیرهای ورودی در شکل 2 الف و ب نشان داده شده‌است. همانگونه که دیده می‌شود در شکل 2 الف

1- Quartile

2- Lower whisker

3- Upper whisker



شکل 2- نمودار جعبه‌ای برای سطح اول (الف) و سطح دوم (ب) متغیرهای ورودی بر اساس میانگین آموزش و آزمون آماره IRMSE  
 Fig. 2- The box plot for the first (A) and second (B) input levels according to the average of the IRMSE of the training and testing steps

مدل تانی در ورودی سطح اول نتایج مناسب و در ورودی سطح دوم نتایج آن بسیار ضعیف شد. غالب مدل‌ها در سطح دوم نتایج مناسب‌تری از خود نشان دادند. به طور کلی باید بیان کرد که در سطح اول برآوردگرها بهترین و ضعیفترین عملکرد به ترتیب مربوط به مدل‌های فرمی و دکستر بوده است. در مورد سطح دوم برآوردگرها نیز بهترین و ضعیفترین عملکرد به ترتیب برای مدل‌های گاردنر و تانی بدست آمد.

### نتیجه‌گیری کلی

مدل‌های فرمی، سکی و گاردنر در سطح خوبی از دقت قرار داشتند و مدل پرکاربرد ون‌گنوختن با دقت بالایی برآورد نشد. مدل کمپل نسبت به مدل ون‌گنوختن دقت بهتری داشت و مدل فرمی نیز از مدل بولتزمن مناسبتر بود. دو مدل دکستر و دورنر که دو نمایی هستند و تعداد پارامتر زیادی هم در مقایسه با دیگر مدل‌ها دارند با دقت ضعیفی برآورد شدند که این موضوع نیاز به تحقیق بیشتر دارد.

**Reference**

- Agyare W, Park S and Vlek P. 2007. Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity. *Vadoze Zone Journal*, 6(2): 423-431.
- Arya LM and Paris JF. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, (45): 1023-1030.
- Baker L, and Ellison D. 2008. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, (144): 212-224.
- Bayat H, Ebrahimi E, Rastgo M, Davatgar N and Zareabiane H. 2013. Investigating the fitting accuracy of different soil water characteristic models on various soil textural classes. *Journal of Soil and Water Knowledge*, 23(3): 159-175. (In Persian).
- Bezdek JC, Keller J, Krishnapuram R and Pal NR. 1999. *Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing*, Kluwer, Boston, London, 776p.
- Bezdek JC and Pal SK. 1992. *Fuzzy models for pattern recognition—methods that search for structures in data*, IEEE Press, Piscataway, USA.
- Brutsaert, W. 1966. Probability laws for pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 101: 85-92. 412.
- Brooks RH and Corey AT. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State University Hydrology Papers No. 3*, Fort Collins, 27p.
- Buchan GD, Grewal K and Robson A. 1993. Improved models of particle-size distribution: An illustration of model comparison techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4): 901-908.
- Campbell GS. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117(6): 311-314.
- Cazemier D, Lagacherie P and Martin-Clouaire R. 2001. A possibility theory approach for estimating available water capacity from imprecise information contained in soil databases. *Geoderma*, 103(1): 113-132.
- Dane JH and Jan WH. 2002. Water retention and storage. In Warren AD (ed.). *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp: 671-717.
- Davatgar N, Kavosi M, Alinia MH and Paykan M. 2006. Study of potassium status and effect of physical and chemical properties of soil on it in paddy soils of Guilan Province. *Journal of Water and Soil Sciences*, 9(4): 71-89. (In Persian).
- Dexter A, Czyz E, Richard G and Reszkowska A. 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143(3): 243-253.
- Durner W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2): 211-223.
- Fooladmand HR and Hadipour S. 2011. Parametric pedotransfer functions of a simple linear scale model for soil moisture retention curve. *African Journal of Agricultural Research*, 6(17): 4000-4004.
- Fredlund DG and Xing A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4): 521-532.
- Frigge M, Hoaglin DC and Iglewicz B. 1989. Some implementations of the boxplot. *The American Statistician*, 43(1): 50-54.
- Gardner W. 1956, *Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils*. Highway Research Board Special Report 40, International Symposium on Physico-Chemical Phenomenon in Soils. Washington DC, pp. 78-87.

- Gee GW and Or D. 2002. Particle-size and analysis. *In*: Warren AD (ed.). Methods of soil analysis Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp: 255-295.
- Groenevelt P and Grant CD. 2004. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. *European Journal of Soil Science*, 55(3): 479-485.
- Grossman RB and Reinsch TG. 2002. *In*: Dane JH, Clarke TG (ed.). Methods of soil analysis Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp: 211-254.
- Hoppner F, Klawonn F, Kruse R and Runkler T. 1999. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, (127): 52- 61.
- Haverkamp R, Leij FJ, Fuentes C, Sciortino A and Ross P. 2005. Soil Water Retention. *Soil Science Society of America Journal*, 69(6): 1881-1890.
- Jana RB, Mohanty BP and Springer EP. 2007. Multiscale pedotransfer functions for soil water retention. *Vadoze Zone Journal*, 6(4): 868-878.
- Khlosi M, Cornelis WM, Douaik A, van Genuchten MT and Gabriels D. 2008. Performance evaluation of models that describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. *Vadoze Zone Journal*, 7(1): 87-96.
- Koekkoek E and Booltink H. 1999. Neural network models to predict soil water retention. *European Journal of Soil Science*, 50(3): 489-495.
- Kosugi Ki. 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research*, 30(4): 891-901.
- Manyame C, Morgan C, Heilman J, Fatondji D, Gerard B and Payne W. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141(3): 407-415.
- Mayr T and Jarvis N. 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model. *Geoderma*, 91(1): 1-9.
- McKee C and Bumb A. 1984. The importance of unsaturated low parameters in designing a hazardous waste site. Hazardous Wastes and Environmental Emergencies Hazardous Materials Control Research Institute National Conference. March 12-14, Houston, Texas, pp: 50-58.
- McKee C and Bumb A. 1987. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. *Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation*, 2(4): 599-608.
- Merdun H, Cınar O, Meral R and Apan M. 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(1): 108-116.
- Millan H, Gonzalez PM, Morilla AA and Perez E. 2007. Self similar organization of Vertislo microstructure a pore solid fractal interretation. *Geoderma*, (138): 185-190.
- Minasny B, Hopmans J, Harter T, Eching S, Tuli A and Denton M. 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2): 417-429.
- Minasny B and McBratney A. 2002. The method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2): 352-361.
- Nabizadeh E and Beigi Harchegani H. 2011. The Fitting Quality of Several Water Retention Models in Soil Samples from Lordegan, Charmahal-va-Bakhtiari. *Journal of Water and Soil*, 25(3): 634-645. (In Persian.)
- Pachepsky YA, Timlin D and Varallyay G. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3): 727-733.
- Perrier E, Bird N and Rieu M. 1999. Generalizing the fractal model of soil structure: The pore-solid fractal approach. *Geoderma*, 88(3): 137-164.
- Rawls W and Pachepsky YA. 2002. Soil consistence and structure as predictors of water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4): 1115-1126.

- Seki K. 2007. SWRC fitted a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(1): 407-437.
- Sillers WS, Fredlund DG and Zakerzadeh N. 2001. Mathematical attributes of some soil—water characteristic curve models. *In: Unsaturated soil concepts and their application in geotechnical practice*, pp: 243-283.
- Tani M. 1982. The properties of a water-table rise produced by a one dimensional, vertical, unsaturated low in Japanese with an English summary. *Journal of Japan forestry Society*, (64): 409-418.
- Tomasella J and Hodnett MG. 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, 163(3): 190-202.
- Tomasella J, Hodnett MG and Rossato L. 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*, (64): 327-338.
- Tukey JW. 1976. *Exploratory data analysis*. 1977. Massachusetts: Addison-Wesley.
- van Genuchten MTh. 1980. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, (44): 892-898.
- van Genuchten MTh, Leij FJ and Yates SR. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, Ada, Oklahoma, 93p.
- Wosten J, Finke P and Jansen M. 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66(3): 227-237.



## Effect of Input Variables on Predictability of Soil Water Content through Different Soil Water Retention Curve Models

Eisa Ebrahimi<sup>1</sup>, Hosein Bayat<sup>2</sup>, Hamid Zare Abyaneh<sup>3</sup>

(Received: October 2013 Accepted: April 2014)

### ABSTRACT

Soil water retention curve (SWRC) is one of the main soil characteristics with many applications. Its direct measurement is costly and time-consuming. Therefore, it is often predicted through indirect methods such as pedotransfer functions (PTFs). Many models have been developed for quantitative description of SWRC and also a lot of PTFs has been developed for their estimation. However, predictability of soil water content through different SWRC models by using different input variables and artificial neural networks have not been investigated, so far. In this study, 75 soil samples were taken from Guilan province and basic soil properties have been measured. Water contents were measured at 12 matric potentials (0, 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000 and 1500 kPa). Ten well known and frequently applied SWRC models were fitted to the measured data. The Perrier model was fitted on the particles and aggregates size distributions and fractal parameters were obtained. The fractal parameters of particles and aggregates size distributions along with clay, sand and bulk density were used to estimate water content in two input levels by different SWRC models. Results showed that the models of Seki, Fermi and Gardner were predicted more accurately, in comparison with other models. In spite of the expectation, the models of Dexter and Durner were not predicted accurately and according to the cluster analysis were classified in different groups. It was observed that the prediction capabilities of different models were changed and their arrangements were altered in the tables by changing input variables. Overall, Fermi and Dexter models had the highest and the least predictability with the first input levels, respectively. Gardner and Tani models had the highest and the least predictability with the second input levels, respectively.

**Keywords:** Cluster analysis, Fractal parameters, Soil water retention curve models

---

1- Former MSc Student of Soil Science, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran (Corresponding author)

Email: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Irrigation, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran.