

استفاده از خصوصیات منحنی تراکم خاک برای تخمین رطوبت خاک با استفاده از مدل ون گنوختن

عبسی ابراهیمی^{۱*}، حسین بیات^۲، سعیده صادقی^۳، محبوبه فلاح^۴، محمد جره^۵، محمد زنگنه^۶

۱. دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه گیلان

۲. دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان

۳. دانشجو دکتری فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه تربیت مدرس

۵. دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه بوعلی سینا همدان

۶. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۲/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۲۰)

چکیده

مدل ون گنوختن معروفترین و پرکاربردترین مدل منحنی نگهداشت آب خاک است. پارامترهای این مدل توسط تخمینگرهای مختلف از جمله بافت خاک تخمین زده شده‌اند. اما تا کنون از خصوصیات منحنی تراکم جهت تخمین پارامترهای مدل ون گنوختن و نهایتاً رطوبت خاک استفاده نشده است. منحنی تراکم یکی از خصوصیات مکانیکی خاک است و رابطه بین تنش- کرنش با مدول الاستیسته در خاک را نشان می‌دهد. دو منحنی نگهداشت آب خاک و منحنی تراکم دارای شباهتهایی هستند. اندازه‌گیری منحنی نگهداشت آب در خاک زمان‌بر و هزینه‌بر است در صورتی که اندازه‌گیری منحنی تراکم ارزان و سریع است. برای انجام این تحقیق ۱۵۰ نمونه خاک از پنج استان ایران به صورت دست خورده و دست نخورده برداشت شد. نگهداشت آب در خاک در دوازده مکش اندازه‌گیری شد. منحنی تراکم با استفاده از دستگاه تک محوری به صورت نمونه محصور بدست آمد. در این طرح از شش سطح تخمینگر که شامل خصوصیات تراکمی و ضرایب معادلاتی هستند برای تخمین رطوبت خاک استفاده شد. استفاده از خصوصیات منحنی تراکم موجب بهبود تخمین منحنی نگهداشت آب خاک در هر دو مرحله آموزش و آزمون مدل گردید. سطوح دوم و ششم به ترتیب با تخمین گرهای تنش پیش تراکمی- شاخص تراکم- شاخص تورم و پارامترهای معادله تنش-پوکی (به صورت غیر مستقیم)، علاوه بر خصوصیات پایه، نسبت به سایر سطوح دقت تخمین بالاتری داشتند (IRMSE=0.092). علت برتری این تخمینگرها را می‌توان همبستگی آن‌ها با ضرایب مدل ون گنوختن و مفهوم مکانیکی تخمینگرها دانست. همچنین تشابه شکل دو منحنی با هم نیز یکی از علل تخمین مناسب رطوبت بود.

واژه‌های کلیدی: تنش پیش تراکمی، مدل ون گنوختن، منحنی نگهداشت آب خاک، منحنی تراکم.

مقدمه

اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی خاک بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است (Minasny *et al.*, 2004). همچنین این خصوصیات‌ها دارای تغییرات مکانی و زمانی بالایی در مزرعه هستند (van Genuchten 1980). از این رو تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک اهمیت بسیاری دارند. Ebrahimi *et al.* (2013) بیان کردند که مدل‌های زیادی توسط محققین برای منحنی نگهداشت آب^۱ (SWRC) در خاک ارائه شده است که این مدل‌ها با یکدیگر تفاوت‌های زیادی دارند و هر کدام از این مدل‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی هستند. از جمله این مدل‌ها

می‌توان به مدل van Genuchten (1980) اشاره کرد. این مدل یک مدل ساده چهار پارامتری است که شکل سیگموئیدی از منحنی نگهداشت آب خاک را ارائه می‌کند (van Genuchten, 1980)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha \psi)^n \right]^{-m} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه (۱) θ_r نشان دهنده رطوبت باقیمانده، θ_s رطوبت اشباع، α عکس مکش ورود هوا به خاک و n پارامتر شکل منحنی و مرتبط با توزیع اندازه منافذ در خاک است (Siller *et al.*, 2001)

مدل ون گنوختن معروفترین و پرکاربردترین مدل تحلیلی است که توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار می‌گیرد (Haghshenas and Beigi Harchegani, 2010; Hodentt and)

* نویسنده مسئول: Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com

1. Soil water retention curve

تراکمی (σ_{pc}) خاک را معمولا با اندازه‌گیری اثر تنش فشاری بر پارامترهای حجمی خاک تعیین می‌نمایند. این مشخصه معمولا با رسم نسبت پوکی (e) یا کرنش عمودی (ϵ) خاک در برابر لگاریتم تنش فشاری عمودی به دست می‌آید. چندین روش برای تعیین تنش پیش تراکمی از منحنی‌های حاصل از آزمایش‌های تراکمی وجود دارد که عبارت‌اند از: روش Casagrande (1936) Schmertmann, (1955) Salfors, (1975) Jose *et al*, (1991) Lebert and Horn, (1989) Dias Junior and Pierce, (1995) Alexandrou and Earl, (1995). رایج‌ترین روش برای تعیین تنش پیش تراکمی، روش نموداری Casagrande (1936) است.

شاخص تراکم (C_c)^۳

شاخص تراکم قدر مطلق شیب خط مماس با خط تراکم دست نخورده بوده و معیاری برای اندازه‌گیری استعداد یا قابلیت تراکم است. به عبارت دیگر شیب قسمت مستقیم الخط منحنی $e - \log \sigma$ است که در تجزیه و تحلیل و محاسبات مقدار نشست از اهمیت خاصی برخوردار است (Larson *et al.*, 1980).

شاخص تورم (C_s)^۴

شاخص تورم عبارت است از قدر مطلق شیب خط تورم و نشان دهنده خاصیت الاستیکی خاک می‌باشد (Keller *et al* 2011). شاخص تورم به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از شاخص تراکم است و از روی منحنی تراکم خاک به دست می‌آید.

معادله گمپرتز

معادله Gompertz (1825) بر اطلاعات تنش-پوکی برازش می‌یابد و چهار ضریب ثابت دارد. محققان زیادی همانند Gregory *et al* (2006) از ضرایب این معادله برای بدست آوردن سایر خصوصیات مکانیکی خاک استفاده کرده‌اند. در زیر معادله Gompertz (1825) نشان داده شده است.

$$e = a + c \exp(-\exp(b(\log \sigma - m))) \quad (\text{رابطه ۴})$$

Gregory *et al* (2006) با استفاده از ضرایب معادله گمپرتز شاخص‌های تراکم و تورم را بدست آوردند (معادلات ۵ تا ۷). Gregory *et al* (2006) بیان کردند که شاخص تورم بر اساس میانگین شیب بارگذاری روی مسیر ۲۵ کیلو پاسکال و میانگین شیب باربرداری مسیر ۸۰۰ کیلو پاسکال بدست خواهد آمد.

(Tomasella, 2002). Bayat, *et al* (2013) قابلیت برازش مدل‌های مختلف را در کلاس‌های بافتی متفاوت با هم مقایسه کردند. این پژوهشگران بیان کردند که مدل ون‌گنوختن نسبت به مدل‌های معروف بروکس-کوری و گاردنر دارای برازش دقیق‌تری است. اما در مقایسه با مدل‌های دو نمایه مانند Seki (2007) دارای دقت ضعیف‌تری است. Ebrahimi *et al* (2014) رطوبت را از طریق مدل ون‌گنوختن با استفاده از رس، شن و BD به روش شبکه عصبی مصنوعی^۱ (ANNs) تخمین زدند و نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این مدل باعث دقت تخمین متوسط رطوبت در بین سایر مدل‌ها گردید.

Baumgartl and Kock (2004) با استفاده از منحنی تراکم مدل ون‌گنوختن را بازنویسی کرده و مدل ون‌گنوختن به صورت معادله ۲ برای برازش بر داده‌های منحنی تحکیم اصلاح شد.

$$\frac{e - e_r}{e_s - e_r} = [1 + (\alpha^* \sigma)^{n^*}]^{-m^*} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این معادله e بیانگر نسبت پوکی، e_r نسبت پوکی در انتهای آزمایش، e_s نسبت پوکی قبل از اعمال تنش به خاک، σ تنش اعمال شده به خاک، α^* ، n^* و m^* پارامترهای برازشی مدل هستند.

Fritton (2001) نیز مدل پایه‌ای ون‌گنوختن را برای نشان دادن تغییرات جرم مخصوص ظاهری با اعمال تنش مورد استفاده قرار داد. با جایگزاری BD به جای مقدار رطوبت و تنش بکار رفته بجای مکش معادله ون‌گنوختن را به یک مدل برای پیش بینی فشردگی خاک تبدیل کرد.

$$\rho = \rho_m - (\rho_m - \rho_o) \left[1 + \{ \alpha'' \sigma \}^{n''} \right]^{-m''} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این معادله پارامترهای α'' ، n'' و m'' پارامترهای مدل ون‌گنوختن هستند. همچنین σ بیانگر تنش می‌باشند.

منحنی تراکم خاک

منحنی تراکم نشان دهنده رابطه بین لگاریتم تنش در مقابل نسبت پوکی است (Keller *et al* 2011). همچنین تحکیم بیانگر رابطه بین لگاریتم تنش در مقابل پوکی در شرایط اشباع است (Baumgartl and Kock 2004).

تنش پیش تراکمی^۲

تنش پیش تراکمی عبارت است از بزرگترین تنشی خاک تا کنون تجربه کرده است (Keller *et al* 2011). تنش پیش

3. Compression Index
4. Swelling Index

1. Artificial neural networks
2. Precompression stress

روی پیستون و تغییر حجم خاک به طور پیوسته ثبت شد (Koolen and Kuipers., 1989). آزمایش تراکم محصور با دستگاه تک محوری صورت گرفت. در این تحقیق نمونه‌های دست نخورده بعد از خروج از دستگاه صفحات فشاری در مکش یک بار برای این آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش تراکم جدار داخلی سیلندر نمونه برداری روغن کاری شده تا اصطکاک بین جداره ظرف و خاک به حداقل برسد و یک صفحه با قطر ۵۲ میلی‌متر (متناسب با قطر داخلی سیلندر) روی نمونه خاک پیش از بار گذاری قرار داده شد و اعمال تنش به نمونه خاک از طریق آن صورت گرفت. آزمایش در دو مرحله بارگذاری و بار برداری انجام شد. بدین صورت که در مرحله بار برداری با فواصل ۰/۰۳۰ و در مرحله بار گذاری با فواصل ۰/۰۱۰ میلی‌متر، از نشانگر کناری میزان نشست قرائت شد. زمانی نشانگر رینگ نیرو یک دور کامل بزند (۱-۰/۰۱ میلی‌متر) مرحله بار گذاری تمام و مرحله بار برداری انجام شد (Koolen., 1974). بنابراین منحنی تنش-کرنش خاک در حالت غیر اشباع به دست آمد (Koolen and Kuipers, 1989). با استفاده از معادله (۸) عدد رینگ به نیرو بر حسب کیلو نیوتن تبدیل شد. همچنین در پایان نیز با استفاده از معادله (۹) نسبت پوکی متناظر با هر تنش بدست آمد.

$$F = 2.1643a + 0.0137 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در معادله بالا F بیانگر نیرو بر حسب کیلو نیوتن و a عدد رینگ می‌باشد. H ارتفاع اولیه نمونه، e_0 نسبت پوکی اولیه، Δe تغییرات نسبت پوکی، ΔH تغییرات ارتفاع ستون نمونه خاک می‌باشد. سپس منحنی تنش-نسبت پوکی به دست آمد. مدل‌های گمپرتز و معادله ون‌گنوختن که توسط Baumgartl and Kock (2004) برای منحنی تنش-نسبت پوکی تعدیل شده بود (رابطه ۲) بر منحنی تنش-نسبت پوکی برازش و ضرایب آن‌ها به دست آمد.

متغیرهای ورودی

پارامترهایی که به عنوان تخمینگر ضرایب مدل SWRC ونگنوختن استفاده شدند در جدول ۱ نشان داده شده است. در سطوح پنجم و ششم از رگرسیون به صورت زیر برای به دست آوردن متغیرهای تخمین‌گر استفاده شد. در سایر سطوح تخمینگر از اطلاعات آزمایشگاهی و محاسباتی دیگر به عنوان تخمین‌گر استفاده شد. برای ایجاد توابع در این تحقیق از روش شبکه عصبی مصنوعی پرسپرون چند لایه از نرم افزار Matlab 2012 استفاده شد.

$$Cc = \frac{bc}{\exp(1)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$C_{S_{\text{loading}-25kPa}} = \frac{e_0 - e_{25kPa}}{\log(25kPa)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$C_{S_{\text{unloading}-800kPa}} = \frac{e_{\text{final}} - e_{800kPa}}{\log(800kPa)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در معادلات بالا b و c ضرایب مدل گمپرتز، e_0 نسبت پوکی اولیه و e_{25} و e_{800} به ترتیب بیانگر نسبت پوکی در حالتی که به نمونه ۲۵ و ۸۰۰ کیلو پاسکال تنش وارد شده است.

دو منحنی SWRC و منحنی تراکم دارای شباهت نسبی از نظر ظاهر می‌باشند. همچنین برخی ویژگی‌های خاک مانند بافت، ساختمان و ماده آلی بر هر دو منحنی موثر بوده و آنها را کنترل می‌نمایند. با این وجود تا کنون از پارامترهای منحنی تراکم برای تخمین ضرایب SWRC-مدل ونگنوختن استفاده نشده است. تشابهات فوق اساس فیزیکی استفاده از منحنی تراکم برای تخمین منحنی نگهداشت آب در خاک است.

بنابراین اهداف این تحقیق عبارتند از (۱) جایگزینی تنش-کرنش بجای مکش - رطوبت در مدل SWRC ونگنوختن (۲) استفاده از ویژگی‌ها و ضرایب منحنی تراکم جهت تخمین پارامترهای مدل ون‌گنوختن.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و آزمایش‌های پایه

برای انجام این طرح از پنج استان کشور شامل کرمانشاه، مازندران، آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی و همدان مجموعاً ۱۵۰ نمونه به صورت دست خورده و دست نخورده برداشته شد. برای اندازه‌گیری SWRC، رطوبت در مکش‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر با دستگاه جعبه شن^۱ و مکش‌های ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با دستگاه صفحه‌های فشاری^۲ اندازه‌گیری شد (Or and Jon., 2002) بافت خاک به روش هیدرومتر و الک (Gee and Or, 2002) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری BD بر روی نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری انجام شد. (Grossman and Reinsch, 2002)

تراکم محصور

در آزمایش تراکم محصور، خاک در درون یک سیلندر فلزی توسط یک پیستون متحرک به سمت پایین متراکم شده و تنش

1. Sand Box
2. Pressure Plate

سطح ششم: در این حالت همه پارامترهای مدل ونگنوختن حاصل از برازش بر اطلاعات تنش-پوکی به عنوان ورودی رگرسیون خطی و غیر خطی در نظر گرفته شد و پارامترهای حاصل از برازش مدل نامبرده بر منحنی مکش-رطوبت تخمین زده شد. مقادیر پیش‌بینی شده برای هر پارامتر به عنوان تخمینگر در سطح ششم مورد استفاده قرار گرفتند. در واقع هدف سطح پنجم و ششم بررسی این بود که آیا می‌توان با به‌دست آوردن متغیرهای حد واسط و کمکی تخمین منحنی نگه داری آب خاک را بهبود داد یا خیر.

سطح پنجم: در این حالت هر کدام از پارامترهای مدل ونگنوختن منحنی تنش-نسبت پوکی به عنوان تخمینگر اولیه در روش رگرسیون خطی و غیر خطی در نظر گرفته شد و پارامترهای حاصل از برازش مدل ونگنوختن بر اطلاعات مکش-رطوبت تخمین زده شد. بدین صورت که برای هر پارامتر مدل مورد نظر حاصل از برازش بر اطلاعات مکش-رطوبت، پارامتر مشابه آن مدل که حاصل از برازش مدل بر اطلاعات تنش-پوکی بود به عنوان ورودی در نظر گرفته شد. مقدار پیش‌بینی شده برای هر پارامتر به عنوان تخمینگر در سطح پنجم با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱. متغیرهای ورودی برای هر سطح جهت ایجاد توابع مربوط به پنج استان نامبرده

سطح تخمینگر	نوع پارامترها
۱	رس، نسبت سیلت به شن و BD
۲	سطح اول بعلاوه P_c, C_c, C_s
۳	سطح اول بعلاوه پارامترهای مدل گمپرتز (a, b, c, m)
۴	سطح اول بعلاوه ضرایب مدل ونگنوختن حاصل از برازش بر اطلاعات تنش-پوکی
۵	سطح اول بعلاوه پارامترهای تخمینی مدل ونگنوختن سطح اول رگرسیون (در متن شرح داده شده است)
۶	سطح اول بعلاوه پارامترهای تخمینی مدل ونگنوختن سطح دوم رگرسیون (در متن شرح داده شده است)

BD بیانگر جرم مخصوص ظاهری، P_c تنش پیش تراکمی، C_c شاخص تراکم، C_s شاخص تورم و a, b, c و m ضرایب مدل گمپرتز هستند.

$$RI = \frac{IRMSE_1 - IRMSE_n}{IRMSE_1} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$R^2 = \left\{ \frac{N \sum_{i=1}^N \theta_m \theta_p - \sum_{i=1}^N \theta_m \sum_{i=1}^N \theta_p}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N \theta_m^2 - (\sum_{i=1}^N \theta_m)^2} \times \sqrt{N \sum_{i=1}^N \theta_p^2 - (\sum_{i=1}^N \theta_p)^2}} \right\} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$IME = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta_p - \theta_m) d \log |h| \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

θ_p و θ_m به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری و تخمینی در مکش یکسان و N تعداد نقاط اندازه‌گیری هستند. q در فرمول AIC بیانگر تعداد ضرایب مدل است.

IRMSE: انتگرال مجذور میانگین مربعات خطا^۳ (Tietje and Tapkenhinrich, 1993)
 R^2 : ضریب تبیین^۴

معیارهای ارزیابی دقت^۱ و قابلیت اعتماد^۲ مدل

در این تحقیق از خصوصیات اولیه و خصوصیات تراکمی استفاده شده و ضرایب مدل ونگنوختن تخمین زده شدند. در گام بعدی ضرایب تخمین زده شده در هر مرحله را در مدل ونگنوختن قرار داده و منحنی رطوبتی تخمین زده شد برای آن مرحله بدست آمد. سپس منحنی های اندازه‌گیری شده و تخمینی به‌صورت یک به یک با استفاده از آماره‌های ارزیابی باهم مقایسه شدند. برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد PTF های ساخته شده از معیارهای زیر بهره‌گیری شد.

$$IRMSE = \left[\frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta_p - \theta_m)^2 dy \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$AIC = N \ln \left(\frac{\sum (\theta_p - \theta_m)^2}{N} \right) + 2q \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

3. Integrated root mean square error
 4. Coefficient of determination

1. Accuracy
 2. Reliability

تنش- پوکی از معادله شماره ۲ استفاده شد. برای مدل ون گنوختن نسبت پوکی اولیه در حالتی که این معادله بر تنش- پوکی برازش یافته است بیشتر از مقدار رطوبت اشباع در حالتی است که بر مکش- رطوبت برازش یافته است. چراکه پارامتر رطوبت اشباع در مدل ون گنوختن در حالت برازش بر اطلاعات تنش- پوکی معادل با نسبت پوکی اولیه است، دامنه تغییر نسبت پوکی در مقایسه با رطوبت اشباع بیشتر است. این مسئله می تواند دلیل بیشتر بودن نسبت پوکی اولیه نسبت به رطوبت اشباع باشد. همچنین برای این مدل مقادیر α^* بدست آمده از تنش- پوکی کمتر از شرایط مکش- رطوبت است.

Vogel, et al (2001) مدل ون گنوختن را اصلاح کردند. این پژوهشگران مدل ون گنوختن را در نقطه اشباع تا نقطه ورود هوا به خاک تغییر دادند و به جای پارامتر رطوبت اشباع پارامتر θ_m را پیشنهاد کردند. Vogel, et al (2001) بیان کردند که پارامتر جدیدی که بجای رطوبت اشباع در نظر گرفته اند دارای مقادیر بزرگتری نسبت به خود رطوبت اشباع می باشد. Vogel, et al (2001) دامنه پارامتر α برای دوازده کلاس بافتی خاک را برابر با ۰/۰۸-۰/۶۸۶ و میانگین ۰/۱۴۵ گزارش کردند. نکته مهم در مقاله Vogel, et al (2001) این است که نشان دادند با افزایش درصد رس در خاک مقدار پارامترهای n و α کاهش خواهد یافت. Ghanbarian Alavijeh et al (2010) نیز دامنه پارامتر α ون گنوختن را ۰/۰۸-۰/۹۸ با میانگین ۰/۳۵ بدست آوردند که نتایج آنها تقریباً مشابه نتایج این مطالعه است. شاید علت این تشابه تنوع در بافت خاک های مورد مطالعه در این تحقیق و مطالعه Ghanbarian Alavijeh et al (2010) باشد.

Leij, et al (1996) نیز دامنه پارامتر α ون گنوختن را برای سری کامل بافتی بین ۰/۰۰۱-۰/۱۴۵ ارائه کردند. نتایج Leij, et al (2002) نسبت به نتایج Vogel, et al (2001) دارای تناقض است. چرا که Leij, et al (1996) بیان نمودند که با افزایش درصد رس مقدار پارامتر α ون گنوختن افزایش خواهد یافت. Seuntjens (2000) برای یک خاک اسپودوسول شنی میانگین مقادیر تخمینی ضرایب مدل ون گنوختن را در افق سطحی خاک ۰/۰۶۵، ۰/۴۷۶، ۰/۰۱۶ و ۲/۴۱۱ به ترتیب برای رطوبت باقیمانده، رطوبت اشباع، پارامتر α و پارامتر n بدست آوردند. Keller and Arvidsson (2007) نیز مقدار طوبت باقیمانده را برای چهار خاک مورد مطالعه برابر با صفر و برای پارامترهای α و n نیز به ترتیب دامنه ۰/۰۰۹۵-۰/۰۲۵ و ۱/۲۳۲-۱/۱۳۵ بدست آوردند. Dexter and Bird (2001) و Merdun (2006) نیز مقادیر مشابهی برای پارامترهای ون گنوختن گزارش کردند.

AIC: معیار اطلاعات اکائیک^۱ (Akaike, 1974)

IRMSE₁: انتگرال مجذور میانگین مربعات خطا برای

سطح پایه^۲

IRMSE_n: انتگرال مجذور میانگین مربعات خطا برای

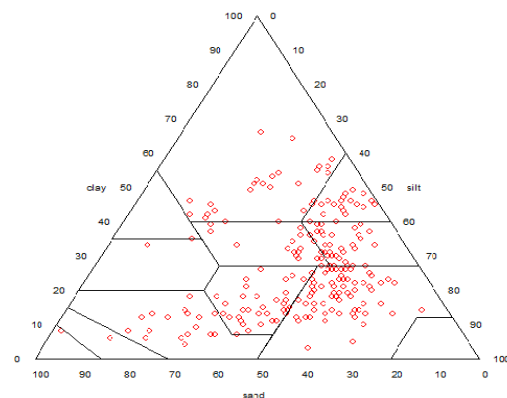
سطح مورد نظر

IME: انتگرال میانگین خطا^۳

RI: ضریب بهبود نسبی^۴

نتایج و بحث

توزیع نمونه ها از نظر بافت خاک به روش USDA در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است به دلیل تعداد زیاد نمونه ها توزیع مناسبی در مثلث بافت خاک مشاهده می شود.



شکل ۱. توزیع نمونه خاک های مورد مطالعه در مثلث بافت خاک

در جدول ۲ مقادیر برازش یافته مدل ون گنوختن بر اطلاعات مکش- رطوبت و تنش- پوکی نشان داده شده است. میانگین ضریب تعیین برازش مدل ون گنوختن بر اطلاعات مکش- رطوبت و تنش- پوکی ۱۵۰ نمونه خاک به ترتیب ۰/۹۳۶ با انحراف استاندارد ۰/۰۸۵ و ۰/۹۷۷ با انحراف استاندارد ۰/۰۲۴ بود. در جدول ۲ بر اساس تغییراتی که در معادله مدل برای برازش بر اطلاعات تنش- پوکی صورت گرفته است پارامترهای جدید (نسبت پوکی اولیه و نسبت پوکی نهایی) بجای پارامترهای اصلی (رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع) در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که با علامت ستاره (α^* و n^*) مشخص شده اند بیانگر برازش مدل ون گنوختن بر اطلاعات تنش- پوکی هستند. برای برازش مدل ون گنوختن بر اطلاعات

1. Akaike information criterion
2. Root mean square error
3. Mean error
4. Relative improvement

جدول ۲. مشخصات آماری پارامترهای مدل ون گنوختن منحنی رطوبت- مکش و تنش -پوکی

انحراف استاندارد	حداکثر	میانگین	حداقل	پارامتر	
۰/۰۸۶	۰/۳۰۵	۰/۰۵۱	۰/۰۰۰	()	
۰/۰۹۱	۰/۷۹۳	۰/۵۶۳	۰/۳۲۶	$\theta_s (cm^3/cm^3)$	رطوبت-
۰/۳۴۲	۰/۹۳۴	۰/۲۶۰	۰/۰۰۳	$\alpha (1/cm)$	مکش
۰/۴۴۲	۴/۹۴۶	۱/۲۲۳	۱/۰۳۹	n	
.	۰/۲۷۰	۰/۲۷	۰/۲۷۰	نسبت پوکی نهایی (cm^3/cm^3)	
۰/۲۰۸	۱/۱۵۵	۰/۸۲۴	۰/۳۴۲	نسبت پوکی اولیه (cm^3/cm^3)	تنش-
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	α^*	پوکی
۰/۲۹۹	۲/۶۷۰	۱/۶۶۲	۱/۰۹۷	n^*	
۱۶/۹	۹۰/۰	۳۲/۸	۵/۹	شن (%)	خصوصیات پایه
۱۵/۸	۷۹/۵	۴۳/۵	۲/۵	سیلت (%)	
۱۳/۸	۶۵/۶	۲۳/۱	۳/۵	رس (%)	
۰/۲	۱/۹۵	۱/۴	۱/۰	BD (g/cm^3)	
۰/۰۶۷	۰/۶۲	۰/۴۷	۰/۲۶	$\theta_s (cm^3/cm^3)$ اندازه گیری شده	
۰/۰۷۲	۱/۶۵	۰/۸۹	۰/۳۶	نسبت پوکی اولیه اندازه گیری شده (cm^3/cm^3)	

افزایش خواهد یافت. دلیل افزایش نگهداشت آب در خاک را می توان به افزایش تخلخل کل با افزایش ذرات ریزتر در خاک نسبت داد. رطوبت اشباع با شن، سیلت، رس، BD و شاخص تراکم رابطه معنی داری دارد. از نظر فیزیکی قابل درک است که رطوبت اشباع در مدل ون گنوختن چون شامل تمامی اجزای آب ثقلی، آب کاپیلاری و آب هیگروسکوپیک می باشد به کلیه عوامل شن، سیلت، رس و BD که بر توزیع اندازه منافذ تاثیر می گذارند، بستگی داشته باشد (Jana et al 2007). Sharma et al (2006) همبستگی معنی دار رطوبت اشباع با کل ویژگی های پایه خاک را گزارش کردند. پارامتر α نیز فقط با P_c همبستگی منفی و معنی داری داشت. به دلیل اینکه این پارامتر معکوس مکش ورود هوا است و تحت تاثیر عوامل مربوط به توزیع اندازه ذرات و منافذ می باشد و توسط منافذ درشت کنترل می شود. با افزایش تنش پیش تراکمی درصد منافذ ریز در خاک افزایش می یابند و منافذ درشت کاهش خواهد یافت. بنابراین این دو پارامتر رابطه عکسی با توزیع اندازه منافذ درشت خاک دارند که در جدول همبستگی نیز این رابطه معکوس نشان داده شده است. Nemes and Rawls (2006) بیان کردند که اجزای بافت خاک باید با خصوصیات از خاک از جمله پارامتر α ون گنوختن همبستگی داشته باشند که این مسئله در اطلاعات موجود دیده نشد. Rawls et al (1982) بیان کردند که عمدتاً افزایش BD و رس باعث کاهش پارامتر α ون گنوختن و افزایش شن موجب افزایش

همبستگی ضرایب مدل ون گنوختن حاصل از برازش بر داده های SWRC با متغیرهای ورودی

در جدول ۳ همبستگی پارامترهای مدل ون گنوختن حاصل از برازش بر داده های SWRC با پارامترهای ورودی نشان داده شده است. رطوبت باقیمانده با رس همبستگی معنی داری نداشت. در این تحقیق از روش هیدرومتر برای اندازه گیری بافت خاک استفاده شد. در این روش عوامل اتصال دهنده ذرات خاک مانند مواد آلی، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و کربنات کلسیم و منیزیم حذف نمی شوند. ممکن است عوامل فوق موجب اتصال ذرات رس خاک به یکدیگر شده و در اندازه های بزرگ تر ظاهر شوند. همچنین رطوبت باقیمانده با شن نیز همبستگی معنی داری نشان نداد. چراکه شن عمدتاً در نقطه رطوبت اشباع و نزدیک به آن تاثیر دارد. در مکش های کم، رطوبت تحت تاثیر ساختمان خاک است. نگهداری رطوبت در مکش های بالا به شدت به توزیع اندازه ذرات ریز بستگی دارد (Pachepsky et al (1996) و Tomasella et al (2003)).

عدم تاثیر شن بر نگهداری رطوبت در مکش های بالا توسط پژوهشگران دیگری نیز گزارش شده است (Hall et al., 1977). در مدل ون گنوختن تمام پارامترها به طور مستقیم یا غیر مستقیم در ارتباط با توزیع اندازه ذرات هستند. با افزایش درصد منافذ ریز مقدار نگهداشت آب در خاک در حالت اشباع

به دست آمده نیز مفید بودن استفاده از این متغیرها در تخمین رطوبت خاک را نشان داد.

مقایسه سطوح مختلف تخمینگرها

در جدول ۴ مقایسه دقت تخمین رطوبت از طریق مدل ون گنوختن با استفاده از شش سطح متغیرهای ورودی برای خاک های پنج استان نامبرده در دو بخش آموزش و آزمون نشان داده شده است.

سطح اول

در سطح اول که از ویژگی‌های پایه به عنوان تخمینگر استفاده گردید دقت تخمین در سطح نسبتا خوبی بود. Schaap and Leij (1998) با استفاده از ANNs و متغیرهای ورودی نسبتا مشابه سطح اول مقدار RMSE را برای مدل ون گنوختن برابر با ۰/۱۰۹ و ۰/۱۰۷ به ترتیب برای بخش آموزش و آزمون بدست آوردند، که نسبت به نتایج حاصل از این مطالعه توابع آنها ضعیفتر بود.

سطح دوم

در سطح دوم از اطلاعات پایه و ویژگی‌های مکانیکی (تنش پیش تراکمی، شاخص تراکم و شاخص تورم) به عنوان تخمینگر استفاده شد در مقایسه با سایر سطوح در بخش آموزش دارای IRMSE پایین تری بود و در بخش آزمون نیز نسبت به سایر سطوح دارای نتایج خوبی بود. به طور کلی در تخمین رطوبت از طریق مدل ون گنوختن می توان سطح دوم را جزء بهترین سطوح در نظر گرفت. دلیل دقت مناسب سطح دوم استفاده ترکیبی از خصوصیات بافتی و خصوصیات منحنی تراکم می-باشد. در تخمین پارامترهای مدل ون گنوختن نیز نشان داده شده که استفاده توام این دو نوع تخمینگر باعث افزایش دقت تخمین ها می شود. Fooladmand and Hadipour (2011) با استفاده از رطوبت اشباع، رس و شن از توابع انتقالی راولز و براکنسیک برای تخمین پارامترهای مدل ون گنوختن استفاده کردند و مقدار میانگین RMSE را برابر با ۰/۴۴ بدست آوردند.

در بخش آزمون سطح دوم و ششم دارای بهترین نتایج بوده و با بالاترین دقت رطوبت را تخمین زدند. احتمالا نتایج خوب سطح دوم به دلیل تخمین مناسبی است که از ضرایب مدل در سطح دوم به دست آمده است (نتایج نشان داده نشده است). تخمین مناسب ناشی از ارتباط فیزیکی و همبستگی بالای بین پارامترها است. در همین راستا Lebert and Horn (1991) بیان کردند که با افزایش درصد رس خاک مقدار تنش پیش تراکمی و شاخص تراکم افزایش خواهند یافت. Merdun (2006) با استفاده از ورودی‌های رس، سیلت، شن،

این پارامتر خواهد شد. پارامتر n شیب SWRC و توزیع منافذ در کل دامنه مکش را تعیین می کند (van Genuchten, 1980). Siller et al (2001) بیان کردند که این پارامتر در ارتباط با توزیع اندازه منافذ خاک است. بنابراین عوامل کنترل کننده توزیع اندازه منافذ همانند توزیع اندازه ذرات، ماد آلی، BD و سایر عوامل مربوطه نیز بر بزرگی این پارامتر تاثیر خواهند گذاشت. در جدول ۳ مشاهده می شود که پارامتر n با سیلت و a معادله گمپترت همبستگی معنی دار داشت. تاثیر پارامتر n مدل ون گنوختن در بخش میانی و پر شیب منحنی است. در بین سه ذره رس، سیلت و شن به طور کلی منحنی در قسمت های بالا و نزدیک نقطه اشباع عمدتا به شن بستگی دارد تا دو ذره دیگر و در قسمت انتهایی تابع رس است و می توان قسمت میانی را به منافذ متوسطی که توسط سیلت ایجاد می شوند ارتباط داد. هر چند که منافذ متوسط می تواند علت هایی غیر از ذرات با اندازه متوسط (سیلت) نیز داشته باشد. عمده منطقه اثر سیلت و پارامتر n روی منحنی تقریبا همپوشانی دارند.

جدول ۳. همبستگی پارامترهای مدل ون گنوختن با متغیرهای ورودی

	n	$\alpha(1/cm)$	$\theta_s(v/v)$	$\theta_r(v/v)$	
شن (%)	-۰/۱۲۴	۰/۰۵۰	-۰/۳۴۴**	۰/۰۸۴	
سیلت (%)	۰/۱۴۸*	۰/۰۵۷	۰/۲۵۱**	۰/۱۵۷*	
رس (%)	-۰/۰۰۹	-۰/۱۱۱	۰/۱۵۴*	-۰/۰۵۰	
BD (gr/cm ³)	-۰/۰۶۷	۰/۰۷۵	-۰/۳۶۲**	۰/۰۳۰	
Pc (kPa)	-۰/۰۱۶	-۰/۱۸۸*	-۰/۰۴۲	-۰/۰۹۹	
Cc	-۰/۰۱۲	-۰/۰۸۵	۰/۱۶۵*	-۰/۰۶۶	
Cs	-۰/۰۲۸	-۰/۰۰۷	-۰/۰۵۴	-۰/۰۹۷	
a	۰/۱۳۹*	۰/۰۳۵	۰/۰۷۳	-۰/۰۱۲	
b	۰/۰۸۲	-۰/۰۷۸	۰/۰۶۰	-۰/۰۴۰	
c	-۰/۰۷۹	۰/۰۳۸	۰/۰۲۳	۰/۰۵۸	
m	-۰/۰۳۴	-۰/۰۱۲	۰/۰۹۸	۰/۱۳۰	
e _r *	۰/۰۱۶	۰/۰۵۲	۰/۰۳۸	۰/۰۵	
e _s *	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۱۵۷	۰/۰۵	
α *	-۰/۰۳۲	-۰/۰۲۰	-۰/۱۰۹	-۰/۰۰۱	
n*	۰/۰۲۴	-۰/۰۳۹	-۰/۱۵۹	-۰/۰۱۱	

**معنی داری در سطح ۱٪ و *معنی داری در سطح ۵٪ را نشان می دهند. حروفی که با علامت * نشان داده شده اند ضرایب مدل ون گنوختن هستند که از برازش مدل بر اطلاعات تنش-پوکی بدست آمده اند.

همبستگی های گزارش شده در جدول ۳، همبستگی های ساده خطی می باشند. در صورتیکه در غالب موارد همبستگی بین پارامترهای مدل ون گنوختن با متغیرهای ورودی غیر خطی و پیچیده می باشد. با توجه به اینکه روش استفاده شده در این تحقیق شبکه های عصبی مصنوعی بود که قادر است روابط غیر خطی و پیچیده را تشخیص داده و شبیه سازی نماید، به همین علت از این متغیرها به عنوان تخمین گر استفاده شد. نتایج

نظیر به نظیر پارامترهای مدل ون گنوختن حاصل از برازش بر داده‌های رطوبت-مکش با استفاده از پارامترهای مدل ون گنوختن حاصل از برازش بر داده‌های تنش-پوکی مناسب نبوده و دقت تخمین‌ها کاهش یافته است.

هرچند دلیل دیگری که احتمالاً بر دقت تخمین اثر گذاشته است صفر بودن رطوبت باقیمانده در تعداد زیادی از نمونه‌ها است که تخمین‌پذیری این پارامتر را کاهش داده است. *Medina et al* (2002) مدل *Vereecken et al* (1989) را که در آن از پارامترهای مدل ون گنوختن استفاده شده بود را تخمین زدند و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) برابر با ۰/۰۸۳ را بدست آوردند. *Minasny et al*, (1999) بیان کردند که ممکن است چندین علت برای تخمین نسبتاً ضعیف مدل ون گنوختن وجود داشته باشد؛ تخمین دو پارامتر α و n معمولاً مشکل بوده و در تخمین این دو پارامتر نیز بیش تخمینی رخ خواهد داد که این بیش تخمینی را می‌توان با استفاده از رگرسیون غیر خطی حل کرد.

سطح ششم

در سطح ششم از ضرایب تخمین زده شده توسط سطح دوم روش رگرسیون خطی و غیر خطی به همراه ورودی‌های سطح اول به عنوان تخمینگر استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده غیر مستقیم از اطلاعات تنش-پوکی نیز به اندازه استفاده مستقیم می‌تواند دقت تخمین را افزایش دهد. این سطح دارای نتایج خوبی بوده و دقت آن در سطح بالایی نسبت به سایر سطوح قرار گرفت. در این سطح مشاهده می‌شود که میانگین آماره R^2 نیز در مقایسه با سایر سطوح دارای نتایج بسیار خوبی است. با تغییر تنش اعمال شده به خاک بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی از قبیل ساختمان، BD و توزیع اندازه منافذ در خاک نیز تغییر خواهند کرد. تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک باعث تغییر پارامتر n می‌شود. چراکه این پارامتر تابع توزیع اندازه منافذ در خاک است (*Sillier et al.*, 2001). نقطه مشترک دیگر تاثیر رس بر هر دو منحنی است. افزایش رس باعث افزایش مقدار رطوبت باقیمانده می‌شود و از طرفی افزایش رس باعث افزایش تنش پیش تراکمی و شاخص تراکم خواهد شد (*Imhoff et al.*, 2004, *Lebert and Horn*, 1991). منحنی توسط عوامل مشترک باعث ایجاد ارتباط بین دو منحنی بوده و موجب گردید که استفاده از ویژگی‌های منحنی تراکم به‌عنوان تخمین گر موجب بهبود تخمین SWRC گردد.

BD، و تخلخل خاک مدل ون گنوختن را با روش رگرسیونی تخمین زد که برای پارامترهای α و n دقت تخمین مناسبتری نسبت به مطالعه حاضر به دست آورد. اما برای دو پارامتر دیگر دقت تخمین در مطالعه حاضر بالاتر بود.

سطح سوم

در سطح سوم از پارامترهای معادله گمپرتز (a, b, c و m) به همراه ورودی‌های سطح اول به عنوان تخمینگر استفاده شد. در بخش آموزش نتایج تخمین این سطح نسبتاً متوسط بود اما در بخش آزمون دقت تخمین نسبت به سطح اول کاهش یافت (ضریب بهبود نسبی منفی شده است). شاید عدم وجود همبستگی خوب بین پارامترهای مدل ون گنوختن با پارامترهای معادله گمپرتز علت کاهش دقت در مرحله آزمون این سطح باشد.

Ghanbarian Alavijeh et al (2010) با استفاده از ابعاد فراکتالی پارامترهای مدل ون گنوختن را تخمین زدند و با استفاده از مدل ون گنوختن SWRC را بدست آوردند که مقدار AIC و RMSE بدست آمده توسط این محققین به ترتیب برابر با ۳۰۹۹- و ۰/۰۸۱ بود. از نظر آماره AIC استفاده از مشخصات منحنی تراکم نسبت به ابعاد فراکتالی باعث بهبود بیشتری در دقت گردید.

سطح چهارم

در سطح چهارم از پارامترهای مدل ون گنوختن که حاصل برازش مدل بر داده‌های تنش-پوکی بودند به همراه ورودی‌های سطح اول به عنوان تخمینگر استفاده شد. مشاهده می‌شود که دقت نسبتاً خوبی برای تخمین SWRC با استفاده از این نوع تخمینگرها بدست آمد. در این سطح نیز هفت تخمینگر مورد استفاده قرار گرفتند و از نظر تعداد ورودی با سطح سوم برابر است، اما نتایج سطح چهارم نسبت به سطح سوم مناسبتر است. احتمالاً علت این است که در سطح چهارم از پارامترهایی به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شده است که مشابه با متغیرهای خروجی هستند. یعنی مدل برازش شده بر هر دو منحنی رطوبت-مکش و تنش-پوکی مشابه است.

سطح پنجم

سطح پنجم به عنوان ضعیفترین سطح انتخاب شد. در بخش آموزش سطح پنجم دارای ضعیفترین IRMSE می‌باشد. *Minasny et al* (1999) بیان کردند که تخمین پارامترهای ون گنوختن دارای بیش تخمینی بودند و این بیش تخمینی سبب کاهش دقت تخمین در مدل گردید. به نظر می‌رسد استفاده از روش رگرسیونی به عنوان حد واسط برای تخمین

1. Root mean square error

نمودارهای این مطالعه دارای خطای بیشتری بودند. Minasny *et al.*, (1999) مقایسه نمودارهای حاصل از اندازه‌گیری و تخمینی توسط ANN و تخمینی توسط رگرسیون را مقایسه کردند و مشاهده کردند که منحنی‌های تخمین زده شده در روش ANN دارای هماهنگی بیشتر با منحنی اندازه‌گیری شده بودند.

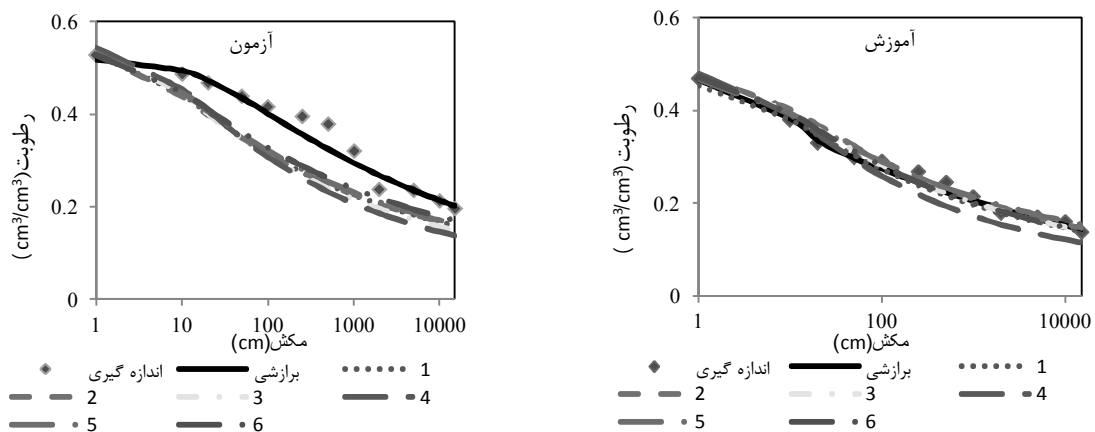
جدول ۴. نتایج حاصل از تخمین مدل ون گنوختن در شش سطح تخمینگر

AIC	r_R	IME ($cm^3 cm^{-3}$)	IRMSE ($cm^3 cm^{-3}$)	سطح تخمینگر
-۴۰۲۱	۰/۹۴۹	-۰/۰۷۴	۰/۰۹۴	۱
-۴۰۴۴	۰/۹۴۴	-۰/۰۶۹	۰/۰۹۲	۲
-۳۹۵۹	۰/۹۴۸	-۰/۰۸۰	۰/۰۹۹	۳
-۴۰۷۹	۰/۹۵۰	-۰/۰۷۳	۰/۰۹۴	۴
-۳۸۰۹	۰/۹۴۱	-۰/۰۸۵	۰/۱۰۳	۵
-۴۰۷۹	۰/۹۵۴	-۰/۰۷۴	۰/۰۹۲	۶

-۴۰۳۹	۰/۹۵۶	-۰/۰۶۳	۰/۰۹۵	۱
-۴۱۲۷	۰/۹۵۷	-۰/۰۶۲	۰/۰۹۲	۲
-۳۹۹۸	۰/۹۴۴	-۰/۰۷۴	۰/۰۹۸	۳
-۴۱۲۰	۰/۹۵۳	-۰/۰۶۳	۰/۰۹۳	۴
-۳۸۳۷	۰/۹۴۹	-۰/۰۷۴	۰/۱۰۳	۵
-۴۱۱۲	۰/۹۵۶	-۰/۰۵۹	۰/۰۹۱	۶

تمام تخمین‌ها دارای اریب هستند (جدول ۴) و مقادیر پیش بینی را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری برآورد کرده اند. هر چند عامل این مسئله دقیقاً بر محققان روشن نیست، ولی احتمال می‌رود نوع تخمین گرهای استفاده شده از عوامل موثر بر ایجاد اریب در تخمین‌ها باشد. البته چگونگی تخمین منحنی رطوبتی در این تحقیق نیز می‌تواند عامل ایجاد اریب باشد. چون در این تحقیق ابتدا ضرایب از طریق توابع ایجاد شده تخمین زده شده و سپس ضرایب تخمینی در هر مرحله برای محاسبه رطوبت در مکش‌های مختلف با استفاده از مدل ون گنوختن برای آن مرحله استفاده شدند. اگر یکی از ضرایب با اریب تخمین زده شود، می‌تواند باعث ایجاد اریب اساسی در تخمین منحنی رطوبتی شود.

در شکل ۳ در هر نمودار هفت منحنی برای مدل ون گنوختن و نقاط اندازه‌گیری نشان داده شده است. این منحنی‌ها شامل منحنی برازشی و شش منحنی تخمینی می‌باشند. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که تطابق خوبی بین منحنی‌های برازشی و تخمینی وجود دارد. این منحنی‌ها تاییدی بر نتایج جدول (۶) هستند. Simuenek *et al* (1998) با استفاده از ورودی‌های معمول رس، شن و BD با روش ANN ضرایب مدل ون گنوختن را تخمین زدند و مشاهده کردند که فاصله بیشتری بین دو نمودار اندازه‌گیری و تخمینی وجود دارد و در مقایسه با



شکل ۳. مقایسه منحنی‌های مدل ون گنوختن در شش سطح و حالت برازشی و نقاط اندازه‌گیری شده رطوبت برای یک نمونه خاک در هر بخش آموزش و آزمون

تخمینگر همگی به طور مستقیم یا غیر مستقیم (استفاده از معادلات) برگرفته از منحنی تراکم بودند. نتایج نشان دادند که استفاده از خصوصیات تراکمی مانند تنش پیش تراکمی، شاخص تراکم و شاخص تورم به همراه رس، نسبت سیلت به شن و جرم مخصوص ظاهری نسبت به دیگر تخمینگرها دقت بالاتری

نتیجه گیری

در این تحقیق از خصوصیات تراکمی استفاده شده و ضرایب مدل ون گنوختن تخمین زده شدند. منحنی تراکم شکل و روند فیزیکی نسبتاً مشابهی با SWRC دارد. این شباهت‌ها دلیل استفاده از منحنی تراکم برای تخمین SWRC بود. شش سطح

آمده از این تحقیق نشان داد که منحنی‌های SWRC سطوح ششم و دوم به ترتیب بالاترین دقت‌ها را داشتند. بنابراین استفاده از ویژگی‌های منحنی تراکم جهت تخمین ضرایب مدل ون‌گنوختن و در نتیجه رطوبت خاک مفید است.

داشت. تخمینگرهای سطوح ششم و دوم که کمترین خطا را داشتند به عنوان بهترین تخمینگرها معرفی شدند. احتمالاً علت این برتری فیزیکی بودن تخمینگرها و وجود همبستگی بین تخمینگرها و پارامترهای SWRC بود. مقایسه نمودارهای بدست

REFERENCES

- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Automa Contr.* 19:716-723.
- Alexandrou, A. and Earl, R. (1995). The development of techniques for assessing compactibility of field soils. A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy Cranfield University Silsoe College
- Barbosa, O. A., Taboada, M. A., Rodrigues, M. B., and Cosentino, D. J. (1997). Regeneraion de la estructura en diferentes fases degradacion de un suelo franco limoso de la pampa Ondulada. *Ciencia del suelo*, 15, 81-86.
- Baumgartl, Th., and Kock, B. (2004). Modeling Volume Change and Mechanical Properties with Hydraulic Models. *Soil Science Society of American Journal*, 68, 57-65.
- Bayat, H., Ebrahimi, I., Rastgo, M., Zare abyaneh, H., Davatghar, N. (2013). Fitting Different Soil Water Characteristic Curve Models on the Experimental Data of Various Textural Classes of Guilan Province Soils. *Water and Soil Science*, 23 (3), 151-167. (In Farsi)
- Casagrande, A. (1936). The determination of preconsolidation load and its practical significance. *International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering*, 22-26 June, Cambridge, MA, 3: 60-64.
- Cavaliere, K. M., Arvidsson, V. J., Silva, A.P., and Kellr, T. (2008). Determination of precompression stress form uniaxial compression test. *Soil and Tillage Research*, 31, 277-282.
- Dexter, A. R., and Bird, N. R. A. (2001). Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 57, 203-212.
- Dias Junior, M. S., and Pierce, F. J. (1995). A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8, 139-151.
- Eisa Ebrahimi, E., Bayat, H., Neyshaburi, M. R., and Zare abyaneh, H., (2013). Investigating prediction capability of different soil water retention curve models using artificial neural networks. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 859-879.
- Fooladmand, H. R., and Hadipour, S. (2011). Parametric pedotransfer functions of a simple linear scale model for soil moisture retention curve. *African Journal Of Agriculture Research*, 6(17), 4000-1004.
- Fritton, D. D. (2001). An Improved Empirical Equation for Uniaxial Soil Compression for a Wide Range of Applied Stresses recompress. *Soil Science Society of American Journal*, 678-684.
- Gee, G.W., and Or, D. (2002). Particle-size and analysis. In: Warren, A.D. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods*. Madison. WI, USA: *Soil Science Society of American Journal*, 255-295.
- Ghanbarian Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G. H., and Van Genuchten, M. T. (2010). Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Pedosphere*, 20(4), 456-465.
- Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life continecies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 115, 513-585.
- Gregory, A. S., Whalley, W. R., Watts, C. W., Bird, N. R. A., Hallett, P. D., and Whitmore, A. P. (2006). Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89, 45-57.
- Grossman, R. B., and Reinsch, T. G. (2002). In: Dane, J.H. Clarke, T.G (Ed.), *Methods of soil analysis part 5. Physical Methods*. Madison. WI, USA: *Soil Science Society of American Journal*, 255-295.
- Haghshenas, M., Beigi Harchegani, H. (2010). The effect of Mianeh zeolite on water retention and water retention models in two soil textures. *Iran Water research Journal*, 4 (6), 35-42. (In Farsi)
- Hall, D. G., Reeve, M. J., Thomasson, A. J., and Wright, V. F. (1977). Water retention, porosity and density of field soils. *Soil Survey of England and Wales. Harpenden, Technical Monograph*, 9, 75.
- Hodent, M. G., and Tomasella J. (2002). Water retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*, 108, 155-180.
- Imhoff, S., Dasilva, A. P., and Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of American Journal*, 68, 17-24.
- Larson, W. E., Blacke, G. R., Allmaras, R. R., Voorhess, W. B., and Gupta, S. C. (Eds), *Mechanics and Related Processes in structured Agricultural Soils*. Proceeding of 2th Workshop, NATO ASI Series, Kluwer, Dordrecht.

- Jana, R. B., Mohanty, B. P., and Springer, E. P. (2007). Multiscale pedotransfer functions for soil water retention. *Vadose Zone*, 6, 868-878.
- Jose, B. T., Sridharan, A., and Abraham, B. M. (1989). Log-log method for determination of preconsolidation pressure. *Geotechnical Testing Journal*, 12, 230-237.
- Keller, T. M., Lamande, P. S., and Dexter A. R. (2011). Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163, 13-23.
- Keller, T., and Arvidsson, J. (2007). Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58, 1373-1381.
- Khodaverdiloo, H., Homaei, M., van Genuchten, M. Th., and Ghorbani Dashtaki, Sh. (2011). Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399, 93-99.
- Koolen, A. J. (1974). A method for soil compactibility determination. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19, 271-278.
- Koolen, A. J., and Kuipers, H. (1989). *Soil deformation under compressive force*. PP: 37-52.
- Larson, W. E., Gupta, S. C., and Useche, R. A. (1980). Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of American Journal*, 44, 450-457.
- Lebert, M., and Horn, R. (1991). A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 19, 275-286.
- Leij, F. J., Alves, W. J., van Genuchten, M. Th., and Williams, J. R., (1996). The unsoda unsaturated soil hydraulic database, version 1.0. EPA report EPA/600/R-96/095, EPA National Risk Management Laboratory, G-72, Cincinnati, OH, USA. (<http://www.epa.gov/ada/models.html>).
- Leij, F. J., Ghezzehei, T. A., and Or, D. (2002). Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil and Tillage Research*, 6, 61-78.
- Medina, H., Tarawally, M., delValle, A., and Ruiz, M. E. (2002). Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data. *Geoderma*, 108, 277-285
- Merdun, H. (2006). Pedotransfer functions for point and parametric estimations of soil water retention curve. *Plant Soil and Environment*, 52 (7), 321-327.
- Minasny, B., Hopmans J. W., Harter, T., Eching, S. O., Tuli, A., and Denton M. A. (2004). Neural Networks Prediction of Soil Hydraulic Functions for Alluvial Soils Using Multistep Outflow Data. *Soil Science Society of American Journal*, 68,417-429.
- Minasny, B., McBratney, A. B., and Bristow, K. L. (1999). Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma*, 93, 225-253.
- Nagaraj, T., and Murty, B. R. S. (1985). Prediction of the preconsolidation pressure and recompression index of soils. *Journal Geotechnical Testing*, 8(4), 199-202.
- Nemes, A., and Rawls, W. J., (2006). Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132, 47-58.
- Or, D., and Jon, M. W. (2002). Soil Water Content and Water Potential Relationships. In: Warrick, A. W. *Soil Physics Companion*, CRC Press, 73-77.
- Pachepsky, Y. A., Timlin, D., and Varallyaay, G. (1996). Artificial neural networks to estimate soil water retention form easily measurable data. *Soil Science Society of American Journal*, 60, 727-733.
- Pal, D. K., Bhattacharya, T., Ray, S. K., and Bhuse S. R. (2003). Developing a model on the formation and resilience of naturally degraded balck soils of the peninsular india as a decision support system for better land use planning. Unpublished report, NBSS and LUP. Nagpur, India.
- Patil, N. G., Pal, D. K., Mandal, C., and Mandal, D. K. (2012). Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on near neighbor and neural networks approach to estimate AWC. *Journal of arrigation and drainage engineering*, 138(2), 1-10.
- Rajkai, K., Kabo, S., and van Genuchten, M. Th., (2004). Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil and Tillage Research*, 145-152.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., and Saxton, K. E., (1982). Estimation of soil water properties. Trans. ASAE 25, 1316-1320.
- Salfors, G. (1975). *Preconsolidation pressure of soft high plastic clays*. Ph.D. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Gothenburg, Germany.
- Schaap, M. G., and Bouten, W. (1996). Modeling water retention curves of sandy soils using neural netwroks. *Water Resources Research*, 32, 3033-3040.
- Schaap M. G., and Leij F. J., (1998). Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 47(1): 37-42.
- Schaap M. G., Leij F. J., and van Genuchten, M. Th. (2001). Rosetta a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Scheinost, A. C., Sinowis, W., and Auerswald, K. (1997). Regionlaization of soil water retention curves in highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, 78, 129-143.
- Schmertmann, J. H. (1955). The undisturbed consolidation behavior of clay. *Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers*, 120, 1201-1233.

- Seki, K. (2007). SWRC fit a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4 (1), 407-437.
- Seuntjens, P. (2000). Reactive Solute Transport in Heterogeneous Porous Medium: Cadmium Leaching in Acid Sandy Soils. Ph.D. Thesis, University of Antwerp, Belgium.
- Sharma, S. K., Mohanty, B. P., and Zhu, J. (2006). Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. *Soil Science Society of American Journal*, 57, 300-306.
- Siller, W.S., Fredlund, D.G., and zakerzadeh, N. (2001). Mathematical attributes of some soil water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 243-283.
- Simunek, J., van Genuchten. M. Th., Gribb. M. M., and Hopmans. J. W. (1998). Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil and Tillage Research*, 27-36.
- Simunek, J., Angulo-Jaramillo, R., Schaap, M. G., Vandervaere. J. P., and van Genuchten. M. Th. (1998). Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. *Geoderma*, 86, 61-81
- Tietje, O., and Tapkenhinrichs, M. M. (1993). Evaluation of pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1088-1095.
- Tomasella, J., Pachepsky, Y. A., Crestana, S., and Rawls, W. J. (2003). Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of American Journal*, 67, 1085-1092.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44, 892-898.
- Vereecken, H., Meas, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989). Estimating unsaturated soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148, 389-403.
- Vogel, T., van Genuchten, M. Th., and Cislerova, M. (2001). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 24, 133-144.
- Vossbrinke, J., and Horn, R. (2004). Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *European Journal of forest Research*, 123, 259-267.
- Wosten, j. H. M., and Finke, P. A. (1995). Comparison of calss and continuous pedotransfer function to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66, 227-237.