

رابطه بین ویژگی‌های مکانیکی و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک‌ها

آزاده صداقت¹، حسین بیات^{2*}، علی اکبر صفری سنجانی³

تاریخ دریافت: 93/06/24 تاریخ پذیرش: 95/03/01

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی سینا- همدان

2- دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه بوعلی سینا- همدان

3- استاد گروه علوم خاک دانشگاه بوعلی سینا- همدان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.bayat@basu.ac.ir

چکیده

هدایت هیدرولیکی خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک در حالت غیراشباع برای شناخت، بررسی و مدل‌سازی انتقال آب، نمک‌ها و آلاینده‌ها در خاک است. هدف از این پژوهش برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع با بهره‌گیری از پارامترهای زود یافت خاک شامل خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی با استفاده از روش رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی بود. در این پژوهش 148 نمونه از 5 استان مازندران، کرمانشاه، آذربایجان غربی و شرقی و همدان جمع‌آوری شد. پارامترهای هدایت هیدرولیکی غیراشباع مدل ون‌گنوختن - معلم (n و α) با استفاده از خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی به‌عنوان تخمین‌گر در 8 مرحله تخمین زده شدند. سپس با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده در هر مرحله منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در دامنه 0 تا 1500 کیلوپاسکال به‌دست آمد. برای ارزیابی دقت توابع منحنی‌های تخمینی در هر مرحله با منحنی‌های برآوردی از روی منحنی نگه‌داری آب خاک مقایسه شدند. نتایج شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش رگرسیونی بهتر بود. چون دامنه معیار آکایک در روش شبکه عصبی مصنوعی بین 4101- و 1169- و در روش رگرسیون بین 1379- و 382- بود. در میان توابع انتقالی ایجادشده با روش شبکه عصبی مصنوعی، مرحله 8 که از مقاومت کششی علاوه بر خصوصیات پایه خاک به‌عنوان برآوردگر بهره‌گیری نموده بود، بهبود بیشتری نسبت به سایر توابع انتقالی در برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع داشت. متغیرهایی که تغییرپذیری کمی دارند نتوانستند برآورد هدایت هیدرولیکی را بهبود دهند ولی پارامترهایی که تغییرپذیری بالایی دارند مانند مقاومت کششی باعث بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی شدند.

واژه‌های کلیدی: تخمین، توابع انتقالی، مدل‌های هدایت هیدرولیکی، مقاومت کششی، هدایت هیدرولیکی غیراشباع

Relationship between Mechanical Properties and Unsaturated Hydraulic Conductivity Curves of Soils

A Sedaghat¹, H Bayat^{*2}, AA Safari Sinejani³

Received: 15 September 2014 Accepted: 21 May 2016

¹ Former M.Sc. Student of Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Associate Prof., Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

³ Prof., Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

* Corresponding Author, Email: h.bayat@basu.ac.ir

Abstract

Soil unsaturated hydraulic conductivity is one of the most important soil physical properties in recognizing, investigating and modeling the transport of water, solutes and pollutants in the soil. The objective of this study was to estimate the soil unsaturated hydraulic conductivity using easy to measure soil physical, mechanical and chemical properties by regression and artificial neural networks (ANNs) methods. In this study, 148 soil samples were taken from five provinces of Mazandaran, Kermanshah, West and East Azarbaijan and Hamedan. Pedotransfer functions were developed using soil physical, chemical and mechanical properties to estimate unsaturated hydraulic conductivity parameters of the van Genuchten- Mualem model (n and α) in 8 steps. The parameters estimated in each step, were used to simulate unsaturated hydraulic conductivity curve in the range of 0 – 1500 kPa. The accuracy of the estimated curves in each step was evaluated using curve by curve comparison with the fitted (measured) unsaturated hydraulic conductivity curve. The ANNs performed better than the regression method, because, the AIC criterion values were obtained between -4101 and -1169 for the ANNs and between -1379 and -382 for the regression. Among the ANNs developed pedotransfer functions, the step 8 which utilized the tensile strength as an estimator along with basic soil properties, performed better than the other models in estimating the hydraulic conductivity. The results showed that the variables with little variability did not improve the estimates of hydraulic conductivity but the parameters with high variability such as tensile strength improved estimates of hydraulic conductivity.

Keywords: Estimation, Hydraulic conductivity models, Pedotransfer functions, Tensile strength, Unsaturated hydraulic conductivity

مقدمه

باشند (موهانتی و همکاران 1994). این خصوصیات، پارامترهای ضروری برای مدل‌سازی حرکت آب و نمک‌ها (آلاینده‌ها) در خاک بوده و نشان‌دهنده توانایی ذاتی خاک برای انتقال آب هستند (فولی و همکاران 2006). به‌علت متغیر بودن هدایت هیدرولیکی در زمان و

هدایت هیدرولیکی غیراشباع به‌صورت تابعی از رطوبت یا مکش خاک تعریف می‌شود. هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک، از مهم‌ترین پارامتر های هیدرولیکی تأثیرگذار بر رفتار آب در خاک می-

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کار می‌رود، ولی به دلیل رفتار پیچیده این پارامتر (قدرت نگه‌داری و مانع شدن از حرکت آب از یک سو و بهبود ساختمان خاک از سوی دیگر) نمی‌توان به سادگی رابطه مستقیمی بین مقدار ماده آلی خاک و مقدار رطوبت خاک برقرار کرد. دعایی و همکاران (2005) گزارش کردند که استفاده از رس، جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی به عنوان تخمین‌گر موجب بهبود تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع گردید.

حدود آتربرگ رابطه قوی با خصوصیات پایه خاک مانند درصد سیلت، شن، رس و جرم مخصوص ظاهری خاک دارند (جونگ و همکاران 1990). عابدینی و هیتیراچی (2002) بیان کردند که مقاومت فروری با اندازه‌گیری سریع و ساده و تکرارپذیری بالا می‌تواند در مطالعات فشرده‌گی خاک و تراکم‌پذیری مورد استفاده قرار گیرد. پارامترهای متعددی از جمله پارامترهای فراکتالی (بیات و همکاران 1393، صداقت و همکاران 2016) برای کمی کردن ساختمان خاک و برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقاومت فروری یک پارامتر زود یافت هست؛ که به جرم مخصوص ظاهری (واز و همکاران 2001)، تخلخل کل، تخلخل درشت و توزیع اندازه منافذ بستگی دارد (وپراسکاس 1984). به همین علت می‌تواند تخمین‌گر خوبی برای هدایت هیدرولیکی خاک باشد.

هیلل (1980) مقاومت کششی⁴ خاک را به عنوان نیروی لازم برای انفصال یا گسیختن ذرات خاک تعریف کرد. فارل و همکاران (1967)، گوئریف (1990) و کاسارانو (1993) دریافته‌اند که با افزایش مقدار رطوبت خاک، مقاومت کششی خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. در واقع افزایش رطوبت خاک باعث ضعیف شدن پیوند بین ذرات خاکدانه‌ها شده و مقاومت کششی آن‌ها را کاهش می‌دهد.

بیات و همکاران (1392) با برآزش مدل‌های مختلف منحنی مشخصه رطوبتی بر داده‌های تجربی در کلاس‌های بافتی متفاوت استان گیلان بیان کردند که مدل‌های

مکان، به خصوص هنگامی که با تعداد زیادی نمونه سروکار داریم، اندازه‌گیری آن دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است.

بنابراین، محققان به دنبال روش‌ها و روابطی هستند که بتوان این قبیل خصوصیات خاک (خواص دیریافت) را از روی ویژگی‌هایی که به طور ساده به دست می‌آیند (خواص زودیافت)، تخمین زد. از روش‌های غیرمستقیم برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک توابع انتقالی (PTF)¹ را می‌توان مثال زد (بوما 1989). در حقیقت، توابع انتقالی خصوصیات زودیافت خاک را به سایر خصوصیات خاک ارتباط می‌دهند. توابع انتقالی به روش‌های مختلف از جمله رگرسیون خطی² و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)³ بسط داده می‌شوند (آگیار و همکاران 2007).

یک گام اساسی در ایجاد توابع انتقالی به دست آوردن متغیرهایی است که تأثیر بیشتری بر بهبود دقت توابع انتقالی دارند. در این راستا متغیرهایی که همبستگی قوی با متغیرهای مورد تخمین دارند، می‌توانند تأثیر بیشتری در افزایش دقت توابع انتقالی داشته باشند. بنابراین یافتن بهترین تخمین‌گرها در ایجاد توابع انتقالی حائز اهمیت است.

پارامترهای متعددی نگهداری رطوبت و در نتیجه هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. علاوه بر درصد ذرات رس، نوع کانی‌های رسی و سطح ویژه ذرات خاک، ماده آلی نیز بر نگهداری آب در خاک مؤثر هست. در حقیقت ماده آلی خاک از یک سو به علت جلوگیری از حرکت آب در خاک باعث کاهش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود. از سوی دیگر با بهبود ساختمان خاک و افزایش مقدار تخلخل خاک سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود (نمس و همکاران 2005). والزاک و همکاران (2004) ادعا نمودند که اگرچه ماده آلی خاک در بسیاری از موارد به عنوان پارامتر ورودی مدل‌های رگرسیون به منظور تخمین

1. Pedotransfer functions

2. Linear regression

3. Artificial neural network

4. Tensile strength

معلم و مدل ون گنوختن یک معادله ساده به دست آورند و با استفاده از پارامترهای منحنی نگه‌داری آب خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع را تخمین زدند. هوانگ و پاورز (2003) نیز با استفاده از مدل‌های توزیع اندازه ذرات هدایت هیدرولیکی غیراشباع را تخمین زدند. تا آنجا که بررسی شد تاکنون از مقاومت فروری و مقاومت کششی برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع استفاده نشده است. بنابراین هدف از این تحقیق استفاده از پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مختلف به-عنوان تخمین‌گر برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش 148 نمونه خاک دست-خورده و دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهایی با ارتفاع 4 سانتی‌متر و قطر 5/1 سانتی‌متر از لایه‌های سطحی و زیرسطحی اراضی پنج استان مازندران (29 نمونه)، کرمانشاه (29 نمونه)، همدان (30 نمونه)، آذربایجان غربی (30 نمونه) و آذربایجان شرقی (30 نمونه) نمونه برداری شد. غالب نمونه‌ها (134 نمونه) از خاک سطحی به عمق 0 تا 30 سانتی‌متر و 14 نمونه از خاک زیر سطحی به عمق 10 تا 65 سانتی‌متر بسته به ضخامت لایه‌ها برداشت شد. نمونه‌ها پس از رساندن به آزمایشگاه برای برخی از آزمایش‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آماده شدند. نقشه شهرها و نقاط نمونه برداری در شکل 1 نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری اجزای بافت خاک از روش الک خشک و هیدرومتر بهره‌گیری شد (گی و ار 2002). جرم مخصوص ظاهری با روش سیلندر اندازه‌گیری شد (گروسمن و رینش 2002).

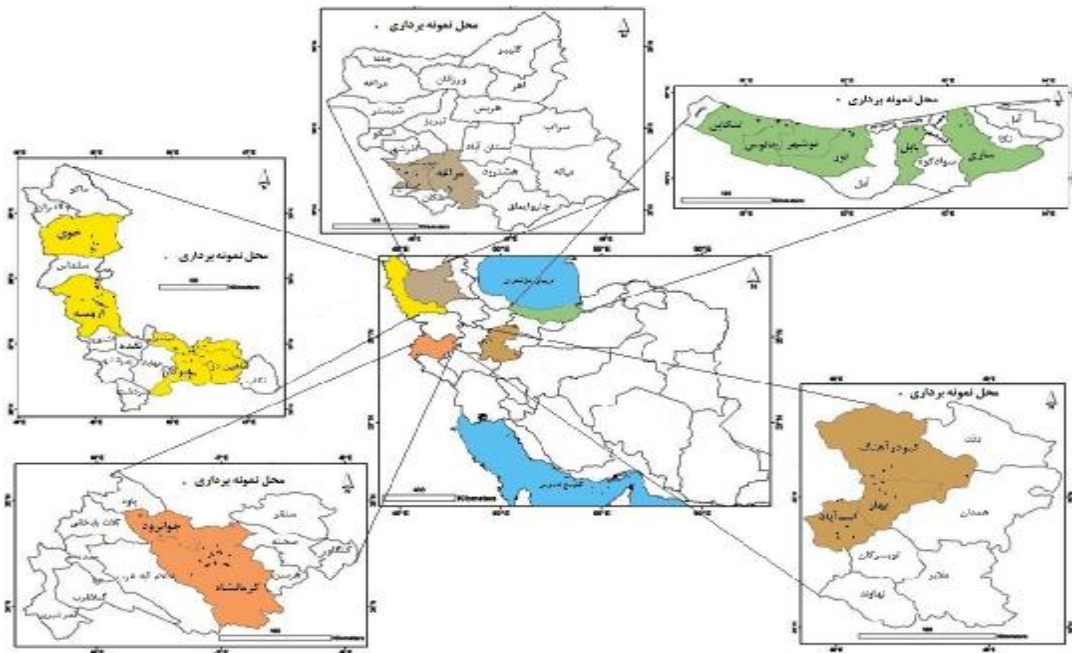
دکستر و فردلاند و زینگ با توجه به برتری نسبی در دقت پیش‌بینی در گروه‌های بافتی و در بیشتر کلاس‌های بافتی نسبت به مدل رایج ون گنوختن برای خاک‌های گیلان ارجح هستند.

مدل‌های آماری زیادی برای توصیف ویژگی‌های هیدرولیکی ارائه شده‌اند که هرکدام دارای پارامترهایی⁵ می‌باشند. در مدل‌های سه پارامتری می‌توان پارامترها را با α ، n و m و مدل دو پارامتری با α و n نشان داد. پارامتر α مکش ماتریکی است که با نقطه عطف منحنی نگه‌داری آب خاک (SWRC)⁶ ارتباط دارد و دارای مفهوم فیزیکی است. این پارامتر ارتباط نزدیکی با نقطه ورود هوا دارد. پارامتر n با شیب ناحیه غیراشباع منحنی نگه‌داری آب خاک مرتبط است. پارامتر m مرتبط با تقارن منحنی نگه‌داری آب خاک حول نقطه عطف است (ون گنوختن 1980). اخیراً مینانسی و مک‌برانتی (2007) پارامتر n ون گنوختن را با بهره‌گیری از درصد شن و رس با روش ANNs برآورد کردند. این محققان گزارش کردند که دقت برآورد آن‌ها قابل‌مقایسه با برآورد پارامتر n مدل ون گنوختن با استفاده از توابع انتقالی ایجادشده از توزیع اندازه ذرات و تخلخل بوده است. اجزای بافت خاک با هر خصوصیتی از خاک، از جمله پارامتر α مدل ون گنوختن (1980)، دارای همبستگی می‌باشند (نمس و راولز 2006).

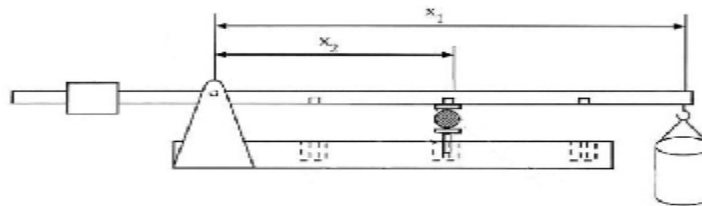
کارسل و پاریش (1988) منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مقابل مکش را برای خاک‌های شنی لومی رسم نموده و با استفاده از مدل‌های مختلف و با روش ANN آن را برآورد کردند. امامی و همکاران (1391) از هدایت هیدرولیکی نقطه عطف منحنی نگه‌داری آب خاک به‌جای هدایت هیدرولیکی اشباع به عنوان مرجع برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع در برخی از مدل‌های مشهور استفاده کردند. این محققان گزارش کردند که مدل ون گنوختن - معلم دقیق-ترین و بهترین مدل برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بود. میشر و همکاران (1990) با ترکیب مدل

⁵. Model parameters

⁶. Soil water retention curve



شکل 1- نقشه شهرها و نقاط نمونه برداری.



شکل 2- دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها (دکستر و واتس 2001).

ظرف، در مرحله‌ای که تنش بحرانی برابر مقاومت خاکدانه شد، خاکدانه ترک بر می‌دارد. در این لحظه جریان آب قطع شده و جرم آب موجود در ظرف اندازه‌گیری می‌شود. مقدار نیروی فشاری لازم برای شکست خاکدانه برحسب نیوتن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{\rho_w}{\rho_s} Mc \cdot \frac{X_1}{X_2} g \quad [1]$$

که در آن، Mc جرم آب لازم برای شکست خاکدانه بر حسب کیلوگرم، X_1 طول اهرم بالا بر حسب متر، X_2 طول اهرم پایین بر حسب متر، و g شتاب ثقل بر حسب متر بر مربع ثانیه هست. در نهایت مقاومت

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در نمونه‌های دست‌نخورده، با روش بار ثابت (کلوت و دیرکسن 1986) انجام شد.

اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها در مکش 100 کیلو پاسکال، بر روی خاکدانه‌هایی به قطر 4 تا 8 میلی‌متر به روش غیرمستقیم یا برزلی با استفاده از دستگاه طراحی شده توسط هورن و دکستر (1989) انجام شد (دکستر و واتس 2001). مبنای کار این روش، اندازه‌گیری نیروی فشاری لازم برای خرد کردن یک خاکدانه در میان دو صفحه بارگذاری صاف و موازی است. در این دستگاه قطعه‌ای که مستقیماً روی خاکدانه قرار می‌گیرد، به کمک یک اهرم و ظرف آب انتهای آن بر نمونه نیرو وارد می‌کند. با افزودن تدریجی آب به درون

مکش‌های 10، 30، 100، 200، 400، 800 و 1500 کیلوپاسکال با بهره‌گیری از دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد.

ضرایب منحنی رطوبتی مدل ون‌گنوختن (1980)

برای به‌دست آوردن ضرایب هدایت هیدرولیکی غیراشباع مدل ون‌گنوختن- معلم ابتدا مدل منحنی نگه‌داری آب خاک (SWRC) ون‌گنوختن (1980) با فرض معلم (1976) $(m = 1 - 1/n)$ با بهره‌گیری از نرم‌افزار بهینه‌ساز Solver بر داده‌های تجربی برازش شد:

$$Se = \frac{1}{\theta_s + (ah)^n \theta^{(1-1/n)}} \quad , \quad Se = \frac{q - qr}{qs - qr} \quad [4]$$

در این مدل α برابر عکس مکش ورود هوا در خاک، h مکش ماتریک، n پارامتر شکل که وابسته به توزیع اندازه منافذ است، Se درجه اشباع مؤثر که در هردو معادله یکی است، θ_r و θ_s به‌ترتیب رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع می‌باشند.

سپس پارامترهای مدل ون‌گنوختن (n و α) و هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع ون‌گنوختن- معلم (ون-گنوختن 1980) در معادله 5 قرار داده شد و هدایت هیدرولیکی در مکش‌های صفر تا 1500 کیلوپاسکال به‌دست آمد. مدل ون‌گنوختن- معلم:

$$K(h) = \frac{\theta_s \left[1 - (ah)^{n-1} \theta_s + (ah)^n \theta^{(1-1/n)} \right]^2}{K_s \left[\theta_s + (ah)^n \theta^{(1-1/n)} \right]^m} \quad m = 1 - 1/n \quad [5]$$

$K(h)$ هدایت هیدرولیکی در مکش h و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد.

کششی خاکدانه‌ها بر حسب نیوتن بر مترمربع به‌کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود (دکستر و واتس 2001):

$$Y = 0.576 \frac{F}{d_{eff}^2} \quad [2]$$

$$d_{eff} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2} \quad [3]$$

d_{max} بیشینه قطر خاکدانه‌ها که برابر با قطر الک بالایی (8 میلی‌متر) و d_{min} کمینه قطر خاکدانه‌ها که برابر با قطر الک پایینی (4 میلی‌متر)، در نظر گرفته شدند. برای اندازه‌گیری مقاومت کششی هر نمونه خاک، مقاومت کششی 40 خاکدانه اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد.

اندازه‌گیری مقاومت فروری با استفاده از ریزفروسنج که بر روی دستگاه تک‌محوری نصب شده بود، بر روی نمونه‌های دست‌نخورده (جمع‌آوری‌شده از لایه‌های سطحی و زیرسطحی) که رطوبت آن‌ها با دستگاه‌های صفحه فشاری به‌مکش ماتریک 100 کیلو پاسکال رسانده شده بود، انجام شد. قطر قاعده مخروط میکروپنترومتر 2/5 میلی‌متر و زاویه آن 30 درجه بود. حد روانی و حد خمیری به‌روش استاندارد BS شماره 1377 (آنونیمو 1975) (با استفاده از ذرات کوچک‌تر از 0/5 میلی‌متر) اندازه‌گیری شدند. حد انقباض نیز با بهره‌گیری از روش استاندارد (ASTMD 427-87) اندازه‌گیری شد. مقدار ماده آلی خاک به‌روش اکسیداسیون تر تعیین شد (والکی و بلک 1934). کربنات کلسیم به‌روش تیتراسیون برگشتی (سیمس 1996) و گنجایش تبادل کاتیونی به‌روش استات آمونیم اندازه‌گیری شد (سامنز و میلر 1996).

به‌دست آوردن منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع مدل ون‌گنوختن- معلم

رطوبت حجمی در مکش‌های صفر، 1، 2، 4 و 6 کیلوپاسکال با بهره‌گیری از دستگاه جعبه شن و در

گام‌های ساخت توابع انتقالی

جدول 2- متغیرهای ورودی استفاده شده برای ایجاد

توابع انتقالی در 8 مرحله.

ورودی هر مرحله	توابع انتقالی
مرحله 1	C, Si/S, BD
مرحله 2	C, Si/S, BD, SL, PL, LL
مرحله 3	C, Si/S, BD, K _s
مرحله 4	C, Si/S, BD, CaCO ₃ , OC
مرحله 5	C, Si/S, BD, CEC
مرحله 6	C, Si/S, BD, PR
مرحله 7	C, Si/S, BD, θ _s
مرحله 8	C, Si/S, BD, TS

C درصد رس، Si/S نسبت سیلت به شن، BD جرم مخصوص ظاهری، LL رطوبت حد روانی، PL رطوبت حد خمیری، SL رطوبت حد انقباض، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، CaCO₃ کربنات کلسیم، OC کربن آلی، CEC ظرفیت تبادل کاتیونی، PR مقاومت فروری، θ_s رطوبت حجمی اشباع، TS مقاومت کششی.

معیارهای ارزیابی دقت

از آماره‌های معیار اطلاعات آکایک⁸ (AIC)، ضریب تبیین⁹ (R²)، بهبود نسبی¹⁰ (RI)، انتگرال جذر میانگین مربعات خطا¹¹ (IRMSE) و انتگرال میانگین خطا¹² (IME) برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد توابع انتقالی استفاده شد. معیار اطلاعات آکایک، AIC (آکایک 1974):

$$AIC = N \ln \frac{\sum_{i=1}^N \hat{\epsilon}_i^2}{N} + 2n_p \quad [6]$$

بهبود نسبی:

$$RI = \frac{IRMSE_1 - IRMSE_i}{IRMSE_1} \cdot 100 \quad [7]$$

در آغاز آزمون نرمال بودن متغیرها با نرم افزار Mini Tab انجام شد و متغیرهایی که توزیع نرمال نداشتند تبدیل شدند (جدول 1). سپس کل متغیرها تبدیل استاندارد شدند تا میانگین صفر و واریانس یک داشته باشند. در روش رگرسیون از 148 داده اندازه‌گیری، دو سوم برای آموزش و یک سوم برای آزمون به صورت تصادفی انتخاب شدند.

فرض صحت رگرسیون خطی، بررسی هم-راستایی بین متغیرهای مستقل است. در این پژوهش برای اینکه مشکل هم‌راستایی ایجاد نشود از نسبت سیلت به شن بهره‌گیری شد. همچنین در تمام مدل‌ها این مسئله از طریق آماره فاکتور تورم واریانس بررسی شد.

برای ایجاد توابع ANN از نرم افزار Matlab 2012

استفاده شد. نوع شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با یک لایه مخفی، 10 سلول پنهان با تابع فعال‌سازی تانژانت سیگموئیدی در لایه پنهان و خروجی انتخاب شد. در این روش از 148 نمونه، 64 درصد (95 نمونه) از نمونه‌ها برای آموزش، 9 درصد (13 نمونه) برای اعتبارسنجی⁷ و 27 درصد (40 نمونه) برای آزمون به صورت تصادفی در نظر گرفته شد. پارامترهای α و n و ونگتختن در 8 مرحله برآورد شدند. پارامترهای ورودی هر مرحله در جدول 2 آورده شده است.

جدول 1- معادله تبدیل نرمال پارامترها.

پارامتر	معادله
Si/S ^a	√Si/S
C	Log (C)
K _s	Log (K _s)
SL	Log (SL)
PL	Log (PL)
LL	Log (LL)
PR	Log (PR)

8. Akaike information criterion

9. Coefficient of determination

10. Relative improvement

11. Integral root mean square error

12. Integral mean error

7. Validation

چون انتخاب داده‌ها برای آموزش و آزمون به صورت تصادفی انجام شد، محدوده تغییرات و میانگین متغیرها برای داده‌های آموزش و آزمون مشابه است. به هر صورت جهت اطمینان از عدم تفاوت، میانگین این دو مجموعه از طریق آزمون t-test مقایسه شدند (توماسلا و همکاران 2003). نتایج نشان داد که تفاوت بین میانگین دو گروه از نظر هیچ‌کدام از متغیرها معنی دار نبود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). مقدار بیشینه جرم مخصوص ظاهری 1/95 گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. این عدد مربوط به نمونه عمقی سری هارون آباد از استان همدان با بافت لوم است. علت بالا بودن جرم مخصوص ظاهری این نمونه وجود سنگریزه زیاد در آن بود. نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق از 12 کلاس بافتی به جز کلاس بافتی سیلت، بقیه را پوشش دادند.

همبستگی بین متغیرهای ورودی و خروجی

ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای به‌کار رفته در PTFها برای داده‌های آموزش و آزمون بررسی شد (جدول 4). در غالب موارد همبستگی‌های بالا و معنی‌داری بین ویژگی‌های پایه خاک و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک وجود داشت (جدول 4).

درصد رس با هدایت هیدرولیکی اشباع همبستگی منفی و معنی‌دار (در سطح احتمال 1 درصد) داشت (جدول 4). چراکه با افزایش میزان رس منافذ ریز افزایش یافته و در نتیجه هدایت هیدرولیکی اشباع که با شعاع منافذ تغییر می‌کند، کاهش می‌یابد (راس و همکاران 2000).

کربنات کلسیم با پارامتر α مدل ون‌گنوختن (1980) رابطه منفی و معنی‌داری را نشان داد. شاید حضور کربنات کلسیم در حد اندازه ذرات ریز عامل این رابطه منفی باشد. چرا که با افزایش اندازه ذرات خاک، منافذ درشت خاک افزایش یافته و قدر مطلق مکش ورود هوا کاهش و پارامتر α ون‌گنوختن افزایش می‌یابد (ون‌گنوختن 1980). امرسون و همکاران (1990) عنوان

در روابط فوق n_p تعداد پارامترهای مدل که باید برآورد شوند، N تعداد نمونه‌های خاک، y_i و \hat{y}_i به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشند. $IRMSE_1$ انتگرال ریشه دوم میانگین مربعات خطا مربوط به مرحله اول، و $IRMSE_i$ انتگرال ریشه دوم میانگین مربعات خطا مربوط به مراحل 2 تا 8 می‌باشد. هر اندازه آکایک منفی‌تر باشد دقت تخمین بیشتر است.

برای ارزیابی خطای کل توابع پارامتریک در هر مرحله پس از برآورد کردن پارامترهای مدل ون‌گنوختن (1980) از آن‌ها برای شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی خاک در آن مرحله بهره‌گیری شد. بدین منظور پارامترهای خروجی (α و n) تخمین زده شده در هر مرحله در مدل ون‌گنوختن - معلم قرار داده شده و هدایت هیدرولیکی در دامنه مکش 0 تا 1500 کیلوپاسکال به دست آمد و به‌عنوان منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع تخمینی برای آن مرحله منظور شد. سپس منحنی شبیه‌سازی شده با منحنی برآورد شده از روی SWRC به صورت منحنی به منحنی از طریق آماره‌های زیر مقایسه گردید.

$$IME = \frac{1}{b-a} \int_a^b (y_i - \hat{y}_i) d \log |h| \quad [8]$$

$$IRMSE = \sqrt{\frac{1}{b-a} \int_a^b (y_i - \hat{y}_i)^2 d \log |h|} \quad [9]$$

h پتانسیل ماتریک بر حسب kPa و y_i و \hat{y}_i معانی قبلی را دارند (تیتجه و تاپکن رینچ 1993).

نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری

ویژگی‌های آماری کلیه متغیرهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون برای روش رگرسیون به تفکیک در جدول 3 آورده شده است.

(1980) همبستگی خطی معنی‌داری نداشتند (جدول 4). اما همبستگی غیرخطی معنی‌داری بین این پارامترها مشاهده شد (نتایج نشان داده نشده است).

کردند که کربنات‌ها به‌عنوان منبع یون کلسیم عمل نموده و به فولکوله شدن ذرات رس و پایداری کمپلکس تبادل‌ی کمک می‌کنند.

حد خمیری، حد روانی و شاخص انقباض نیز با هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای مدل ون‌گنوختن

جدول 3- ویژگی‌های آماری متغیرهای مستقل و وابسته مجموعه داده‌های آموزش و آزمون به‌کار رفته در این تحقیق.

آموزش				آزمون				
میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	بیشینه	
1/60	1/10	0/02	7/06	2/50	2/40	0/10	13/40	$\pm \text{Si/S (-)}$
23/60	13/8	4/10	63/90	22/40	13/90	3/40	65/60	(%) C
1/44	0/15	1/01	1/88	1/39	0/18	1/02	1/95	(gr cm ⁻³) BD
2/08	2/15	0/09	11/03	2/11	2/16	0/15	9/78	(%) OC
6/93	2/51	2/73	14/43	6/90	2/06	3/13	12/86	(%) CaCO ₃
28/19	3/01	1/07	63/39	23/84	12/45	0/65	49/31	(meq 100 gr ⁻¹) CEC
52/73	7/21	32/45	65/13	55/32	6/98	39/20	65/86	(vv ⁻¹) θ_s
9/32	12/76	0/23	63/33	8/83	17/24	0/003	93/06	(cm hr ⁻¹) K _s
41/30	12/6	18/8	81/90	41/10	12/90	21/50	82/90	(gr gr ⁻¹) LL
26/09	7/57	15/38	56/25	26/90	7/30	16/76	52/38	(gr gr ⁻¹) PL
18/76	14/61	8/86	34/23	18/29	4/71	6/18	31/92	(gr gr ⁻¹) SL
2500	1438	531	11305	2047	915	903	5688	(kPa) PR
11/12	3/37	3/71	24/63	11/02	2/71	4/26	18/02	(kPa) TS
0/25	0/34	0/003	0/934	0/287	0/359	0/003	0/930	(cm ⁻¹) α
1/20	0/38	1/03	4/94	1/25	0/55	1/08	4/92	n

± علائم اختصاری تمامی متغیرها در زیر جدول 2 آمده است.

مشابه یافته‌های کاسارانو (1993) است. این محقق گزارش کرد مقاومت کششی در خاک‌های ریز دانه 50 درصد بیشتر از خاک‌های درشت دانه است. از طرفی هودنت و توماسلا (2002) گزارش کردند α و n مدل ون‌گنوختن در خاک‌های درشت بافت بیشترین مقدار خود را دارند. بنابراین تغییرات مقاومت کششی و پارامتر α مدل ون‌گنوختن عکس هم می‌باشند. چون با افزایش رس خاک مقاومت کششی افزایش، مکش ورود هوا افزایش و α و n مدل ون‌گنوختن کاهش می‌یابند.

مقدار رس با مقدار رطوبت حجمی اشباع رابطه مثبت و معنی‌داری (در سطح احتمال 1 درصد) داشت (جدول 4). مصدقی و محبوبی (2011) توابع رگرسیونی برای نگه‌داری آب در خاک در مکش‌های مختلف ایجاد کردند و گزارش نمودند که مقدار رس تأثیر مثبت و معنی‌داری بر رطوبت نگه‌داری شده (از جمله رطوبت گنجایش زراعی) دارد. در مطالعه راولز و پاچپسکی (2002)، مقدار رس بیش‌ترین تأثیر را در تخمین رطوبت ظرفیت زراعی داشت.

باتوجه به جدول 4، مقاومت کششی با α ون-گنوختن همبستگی منفی و معنی‌داری دارد که این نتیجه

نتایج توابع انتقالی

کلیه مراحل با هر دو روش رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی انجام شد که نتایج آن در جدول 5 نشان داده شده است. در جدول 5، AIC_{A-R} مطابق معادله هوانگ و همکاران (2002) محاسبه شده است:

$$AIC_{A-R} = AIC_h + 0.05 AIC_h$$

در اینجا AIC_h ، از میان دو روش AIC تابع انتقالی که عملکرد ضعیفی دارد (آکایی که بالاترین مقدار را دارد) می‌باشد. اگر آکایی تابع انتقالی که عملکرد بهتری دارد کمتر از مقدار AIC_{A-R} باشد تفاوت بین دو تابع معنی‌دار خواهد بود.

در کلیه توابع و در هر دو مرحله آموزش و آزمون توابع حاصل از شبکه عصبی برآورد دقیق‌تری داشتند. علت برآورد دقیق‌تر روش ANN نسبت به روش رگرسیون را می‌توان در نحوه عمل شبکه پرسپترون سه لایه دانست. عملکرد این شبکه به این صورت است که در آغاز الگویی به شبکه عرضه می‌شود و خروجی آن محاسبه می‌شود. سپس شبکه این خروجی را با مقادیر اندازه‌گیری شده یا متغیرهای خروجی مقایسه می‌کند و ضرایب وزنی شبکه را به نوعی تغییر می‌دهد که کمترین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد (میناسنی و همکاران 2004). تاماری و همکاران (1996) با بهره‌گیری از ANN و رگرسیون منحنی رطوبتی خاک را برآورد کردند و کارایی بیشتر ANN را نسبت به رگرسیون خطی تأیید کردند. پاپچسکی و همکاران (1996)، با بهره‌گیری از آماره‌های ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا به بررسی ANN و آنالیز رگرسیون پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ANN برآورد بهتر، با خطای کمتر، براساس داده‌های زودیافت خاک دارد.

با توجه به اینکه نتایج روش شبکه عصبی مصنوعی بهتر از رگرسیون بود به بررسی نتایج شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شد.

مرحله 1: در این مرحله که از وروده‌های رس، نسبت سیلت به شن و جرم مخصوص ظاهری برای تخمین پارامترهای هدایت هیدرولیکی غیراشباع بهره‌گیری شده بود، ضعیف‌ترین نتیجه به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع باید تخمین‌گرهای مناسب و بیشتری را جستجو نمود. شاپ و لیچ (1998) از پارامترهای زودیافت مانند بافت، جرم مخصوص ظاهری و دو نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و مقدار آب خاک با روش ANN بهره‌گیری نموده و گزارش کردند که مقدار RMSE برای لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع (بر حسب سانتی‌متر در روز) در حدود $0/713 \pm 0/840$ بود. آن‌ها همچنین بیان کردند، اضافه کردن جرم مخصوص ظاهری و یک نقطه از منحنی رطوبتی تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع را بهبود داد. مقدار IRMSE در این تحقیق در روش ANN در مرحله آموزش برابر با $0/09$ و در مرحله آزمون برابر با $0/12$ سانتی‌متر در ساعت می‌باشد.

مرحله 2: در این مرحله از حدود آتربرگ به همراه پارامترهای سطح یکم برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع (پارامترهای مدل ون‌گنوختن) بهره‌گیری شد. در مرحله آموزش روش ANN، IRMSE و AIC نسبت به مرحله اول کاهش و R^2 افزایش یافت و بهره‌گیری از حدود آتربرگ اثر معنی‌داری بر بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی داشت (جدول 5). ولی در مرحله آزمون، بهبود معنی‌داری مشاهده نشد. بنسون و تراست (1995) از حد روانی و شاخص خمیری در خاک‌های رسی برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع بهره‌گیری کردند و گزارش نمودند که هدایت هیدرولیکی به‌طور کلی با افزایش حد روانی و حد خمیری کاهش می‌یابد. حد روانی و حد خمیری در ارتباط مستقیم با مینرالوژی خاک یا مقدار رس خاک می‌باشند (طاحونی 1387). افزایش در مقدار رس یا کانی‌های رسی به‌طور کلی متناظر با کاهش اندازه منافذ است؛ که جریان آب را

(1997) گزارش کرد که ماده آلی و مقدار رس دو فاکتور تأثیرگذار بر پارامترهای مدل ون‌گنوختن، در برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌باشند. دکستر و همکاران (2004) نشان دادند که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف در ارتباط با ماده آلی است. ساکستون و همکاران (1986) نیز گزارش کردند که با افزایش ماده آلی شیب منحنی هدایت هیدرولیکی در مقابل رطوبت افزایش پیدا می‌کند. نمس و همکاران (2005) اثر ماده آلی را بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در طیف وسیعی از خاک‌ها بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ماده آلی هدایت هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. ایگو و یدگبونام (2008) گزارش کردند که یون کلسیم و کاتیون‌های چند ظرفیتی، مقدار رس قابل انتشار را به مقدار قابل توجهی کاهش داده و همبستگی $-0/47$ را بین مقدار کلسیم و رس قابل انتشار مشاهده کردند. احتمالاً علت این که در این سطح بهره‌گیری از ماده آلی و کربنات کلسیم اثر معنی‌داری بر برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع داشتند، به‌خاطر تأثیر آن‌ها بر توزیع فضای منافذ باشد (هودسون 1994). چرا که همبستگی منفی و معنی‌داری (در سطح احتمال 5 درصد) بین کربنات کلسیم و پارامتر α مدل ون‌گنوختن وجود داشت (جدول 4).

مرحله 5: در این مرحله از گنجایش تبادل کاتیونی به-همراه ورودی‌های مرحله یکم به‌عنوان برآوردگر بهره‌گیری شد. در هر دو مرحله آموزش و آزمون روش ANN، IRMSE و AIC نسبت به مرحله یکم کاهش و R^2 افزایش یافت و بهبود معنی‌داری در برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع ایجاد شد (جدول 5). براند و تیسر (2000) گزارش کردند که بین ویژگی‌های شیمیایی با هدایت هیدرولیکی و پارامترهای مربوط به منحنی نگاه‌داری آب خاک رابطه قابل قبولی وجود دارد. با افزایش گنجایش تبادل کاتیونی توانایی خاک‌ها برای نگاه‌داری آب افزایش یافته و در نتیجه هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. احتمالاً به‌همین علت استفاده از گنجایش

کنترل می‌کنند و بنابراین هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد (عباسی 1386). بنسون و همکاران (1994) گزارش کردند که کاهش هدایت هیدرولیکی زمانی اتفاق می‌افتد که حد روانی از 20 به 40 درصد و شاخص خمیری از 10 به 30 درصد افزایش پیدا کند. احتمالاً به‌این علت حدود آتربرگ علی‌رغم تأثیر معنی‌دار بر بهبود برآورد در مرحله آموزش اثر معنی‌داری بر بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی در مرحله آزمون نداشتند.

مرحله 3: بهره‌گیری از هدایت هیدرولیکی اشباع به‌عنوان برآوردگر در هر دو مرحله آموزش و آزمون روش ANN، IRMSE و AIC را نسبت به مرحله یکم کاهش و R^2 را افزایش داد و اثر معنی‌داری بر بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی داشت (جدول 5). این نتیجه برخلاف گزارش جارویس و همکاران (2002) بود. آن‌ها گزارش کردند، بهره‌گیری از هدایت هیدرولیکی اشباع به‌عنوان فاکتوری برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع، با استفاده از مدل ون‌گنوختن - معلم یا مدل‌های دیگر، در خاک‌های با ساختمان ریز کارایی چندانی ندارد. شاید توزیع نمونه‌های این پژوهش در 11 کلاس بافتی علت تفاوت موجود باشد. عموماً افزایش BD و رس موجب کاهش پارامتر α مدل ون‌گنوختن و افزایش \ln موجب افزایش پارامتر α مدل ون‌گنوختن می‌شود (راولز و همکاران، 1982). با توجه به گزارشات هودنت و توماسلا (2002)، α و n مدل ون‌گنوختن در خاک‌های درشت بافت بیشترین مقدار خود را دارند. بنابراین تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامتر α و n مدل ون‌گنوختن باید همسو باشند، که این نکته می‌تواند عامل بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع باشد.

مرحله 4: در این مرحله از کربنات کلسیم و کربن آلی به‌همراه پارامترهای مرحله 1 به‌عنوان برآوردگر بهره‌گیری شد. در هر دو مرحله آموزش و آزمون روش ANN، IRMSE و AIC نسبت به سطح یکم کاهش و R^2 افزایش یافت و برآوردگرها اثر معنی‌داری بر بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی داشتند (جدول 5). وستن

گیری از آن موجب بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی شد.

مرحله 7: در این مرحله از رطوبت حجمی اشباع به همراه خصوصیات پایه خاک به عنوان ورودی بهره‌گیری شد. در هر دو مرحله آموزش و آزمون روش ANN، IRMSE و AIC نسبت به مرحله یکم کاهش و R^2 افزایش یافت و برآوردگرها اثر معنی‌داری بر بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی داشتند (جدول 5). سیمونک و ون‌گنوختن (1997) بیان کردند که بین هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامتر n مدل ون‌گنوختن یک همبستگی منفی وجود دارد. در مکش‌های بالاتر پیوستگی بین منافذ کاهش یافته و در نتیجه هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در حالت اشباع منافذ درشت که بیشترین تأثیر را بر هدایت هیدرولیکی دارند از آب اشباع بوده و پیوستگی بین منافذ به بیشترین مقدار می‌رسد. رطوبت حجمی اشباع تقریباً برابر با تخلخل خاک است. در صورت ثابت بودن بافت خاک هر چقدر تخلخل افزایش یابد میزان منافذ و پیوستگی آن‌ها افزایش یافته و هدایت هیدرولیکی افزایش خواهد یافت. به همین علت، بهره‌گیری از رطوبت اشباع موجب بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی گردید.

مرحله 8: در این مرحله استفاده از مقاومت کششی به همراه ورودی‌های مرحله یکم به عنوان برآوردگر موجب بهبود معنی‌دار برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع (پارامترهای α و n مدل ون‌گنوختن) نسبت به مرحله یکم شد (جدول 5).

مقاومت کششی با پارامتر α مدل ون‌گنوختن همبستگی منفی و معنی‌دار (در سطح احتمال 1 درصد) داشت (جدول 4). کاسارانو (1993) هم نتیجه مشابهی را گزارش کرده است. مقاومت کششی، یک ویژگی پویای خاک است و مقاومت نواحی گسیختگی در هر زمان به وجود خلل و فرج پر از هوا، ترک‌های ریز و قدرت پیوندهای میان ذرات در داخل یا میان ترک‌های ریز بستگی دارد. مقاومت کششی خاک با مقدار آب و فرآیندهای تغییر دهنده ویژگی‌های تخلخل و یا پیوستگی میان خاکدانه‌ها ارتباط دارد (کی و دکستر 1992). هدایت هیدرولیکی هم به منافذ کل و پیوستگی منافذ بستگی دارد (قنبریان علویجه و عباسی 1389). در

تبادل کاتیونی موجب بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع گردید. براند و تیسیر (2000) منحنی نگه‌داری آب خاک را در طیف وسیعی از رس‌های آهکی یا با کلسیم اشباع شده، با توجه به متغیر بودن ویژگی‌های خاک رسی، بررسی و بیان کردند که ویژگی‌های رطوبتی از یک خاک رسی به خاک دیگر متفاوت بوده و به مقدار رس، CEC، توزیع اندازه ذرات و تنش هیدرولیکی بستگی دارد.

مرحله 6: استفاده از مقاومت فروروی به عنوان برآوردگر در این سطح موجب بهبود معنی‌دار برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع در هر دو مرحله آموزش و آزمون روش ANN، گردید (جدول 5). مقاومت فروروی خاک تحت تأثیر رطوبت، بافت و شرایط ساختمانی خاک قرار دارد، که در این بین مقدار آب خاک بیشترین اهمیت را دارد (دکستر و همکاران 2007). مقاومت فروروی بر برخی از پدیده‌های مرتبط با ساختمان خاک مانند نفوذ آب در خاک تأثیر می‌گذارد (بیکر و آیرز 1990). با افزایش مقدار آب خاک، مقدار مقاومت فروروی کاهش و با افزایش جرم مخصوص ظاهری، مقدار آن افزایش می‌یابد (پرامپرال 1983). بیات و همکاران (2013) از درصد شن، درصد رس، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل و مقاومت فروروی به عنوان تخمین‌گر برای تخمین SWRC استفاده و گزارش کردند که با اضافه شدن مقاومت فروروی به خصوصیات پایه بهبود قابل توجهی در دقت و قابلیت اطمینان برآورد SWRC به دست آمد. با توجه به جدول 4 مشاهده شد که مقاومت فروروی همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح احتمال 1 درصد) با جرم مخصوص ظاهری که منعکس‌کننده مشخصات ساختمانی خاک است، دارد و دارای همبستگی منفی و معنی‌داری (در سطح احتمال 1 درصد) با رطوبت اشباع می‌باشد. این همبستگی نشان می‌دهد که مقاومت فروروی منعکس‌کننده وضعیت ساختمانی خاک بوده و وابستگی شدید به رطوبت خاک دارد. به همین علت بهره

رس با لگاریتم α و نگوختن را گزارش کردند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که شن مهمترین پارامتر در برآورد لگاریتم α و نگوختن است.

واقع مقاومت کششی می‌تواند شاخصی از درز و ترک‌های ریز باشد که بر هدایت هیدرولیکی اثرگذار می‌باشند. وریکن و همکاران (1989) همبستگی منفی

جدول 4- ضرایب همبستگی ساده بین خصوصیات فیزیکی-شیمیایی - مکانیکی.

	α	n	K _s	Si/S	C	BD	OC	CaCO ₃	CEC	θ_s	LL	PL	SL	PR	T S
α	1														
n	0/12	1													
K _s	0/09	0/01	1												
Si/S	0/03	0/30*	-0/01	1											
C	0/08	-0/01	-	0/26*	1										
BD	0/07	-0/07	-0/08	-	-	1									
OC	0/11	0/14	-0/05	-0/13	0/40*	-	1								
CaCO ₃	0/17	0/02	0/12	0/18*	-0/01	-0/05	-	1							
CEC	0/02	0/04	-0/07	0/12	0/52*	-	0/30*	-0/10	1						
θ_s	0/01	-0/09	0/09	0/32*	0/22*	-	0/18*	0/08	0/31*	1					
LL [±]	-	-0/01	-0/09	0/07	0/26*	-0/13	0/30*	0/11	0/26*	0/11	1				
PL	0/01	0/04	-0/04	0/01	0/27*	-0/14	0/32*	0/10	0/20*	0/09	0/9*	1			
SL	-	0/07	0/01	0/04	0/06	-0/13	0/25*	0/06	0/12	0/03	0/8*	0/8*	1		
PR	0/07	-0/08	-0/27**	-0/06	0/06	0/45*	-0/03	0/01	-0/11	-0/45**	0/08	0/06	0/01	1	
TS	0/28	0/07	0/04	0/18*	0/19*	-0/13	0/36*	0/001	0/15	0/25*	0/1	0/1	0/04	0/03	1

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطوح 5 و 1 درصد را نشان می‌دهند.

[±] علائم اختصاری تمامی متغیرها در زیر جدول 2 آمده است.

منحنی‌های اندازه‌گیری شده نزدیک می‌باشند که نشان دهنده برآورد خوب و عملکرد بالای توابع انتقالی ایجاد شده در این پژوهش است و توابع انتقالی به‌خوبی توانستند هدایت هیدرولیکی غیراشباع مدل ون‌گنوختن- معلم را برآورد کنند. با توجه به اینکه هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده در مکش‌های بالا بسیار ناچیز بود، بنابراین جهت وضوح بیشتر تفاوت بین توابع، هدایت هیدرولیکی در مکش‌های بالا نشان داده نشد. البته بسته به نوع خاک، هدایت هیدرولیکی نشان داده شده برای حداکثر مکش متفاوت است. ترتیب برتری توابع در شکل 3 و 4 عیناً مشابه نتایج جدول 5 نمی‌باشد، زیرا نتایج این جدول، میانگین نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول 5، در روش ANN، مرحله 8 که در آن از مقاومت کششی به‌همراه خصوصیات پایه خاک به‌عنوان برآوردگر بهره‌گیری شده است، بهترین نتایج را بر اساس معیار IRMSE نسبت به سایر مراحل داشت. روابط رگرسیونی به‌دست آمده با روش رگرسیون برای پارامترهای α و n مدل ون‌گنوختن در جدول 6 آورده شده است.

برای نشان دادن دقت توابع ایجاد شده در برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع چهار نمونه از کل نمونه‌ها به‌طور تصادفی انتخاب شد تا منحنی برآورد شده هدایت هیدرولیکی غیراشباع از روی SWRC با منحنی‌های برآوردی توسط توابع مختلف با روش ANN و رگرسیون مقایسه شوند (شکل 3 و 4). منحنی‌های برآورد شده توسط توابع مختلف به

جدول 5- نتایج تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع از طریق مدل ون‌گنوختن - معلم.

	IME(cm hr ⁻¹)	IRMSE (cm hr ⁻¹)	R ²	AIC	RI	IME (cm hr ⁻¹)	IRMSE (cm hr ⁻¹)	R ²	AIC	RI	AIC _{A-R}
	شبکه عصبی مصنوعی (آموزش)					رگرسیون (آموزش)					
مرحله ۱**	-0/04	0/09	0/97	-3007		-0/12	0/24	0/97	-1091		-1145*
مرحله ۲	-0/03	0/07	0/98	-3823*	21/70	-0/11	0/21	0/97	-1181*	12/16	-1240*
مرحله ۳	-0/03	0/07	0/98	-3697*	18/43	-0/10	0/21	0/98	-1379*	13/08	-1447*
مرحله ۴	-0/03	0/07	0/98	-3865*	19/17	-0/12	0/23	0/97	-1101	4/14	-1156*
مرحله ۵	-0/03	0/07	0/98	-3863*	20/90	-0/10	0/21	0/98	-1372*	12/72	-1440*
مرحله ۶	-0/03	0/06	0/98	-4101*	32/30	-0/10	0/22	0/97	-1257*	8/80	-1319*
مرحله ۷	-0/03	0/07	0/98	-3866*	20/90	-0/12	0/24	0/97	-1088	0/66	-1142*
مرحله ۸	-0/03	0/06	0/98	-4087*	320/4	-0/10	0/20	0/99	-1222*	15/09	-1283*
	آزمون					آزمون					
مرحله ۱	-0/06	0/12	0/99	-1269		-0/09	0/18	0/97	-494		-518*
مرحله ۲	-0/06	0/13	0/99	-1169	-6/56	-0/10	0/20	0/96	-435	-6/38	-456*
مرحله ۳	-0/05	0/10	0/99	-1378*	14/15	-0/05	0/21	0/97	-478	-11/57	-606*
مرحله ۴	-0/05	0/10	0/99	-1506*	17/79	-0/09	0/17	0/97	-534*	5/51	-560*
مرحله ۵	-0/05	0/10	0/99	-1429*	15/84	-0/08	0/17	0/97	-660*	10/18	-693*
مرحله ۶	-0/05	0/10	0/99	-1484*	15/89	-0/09	0/18	0/97	-619*	2/34	-649*
مرحله ۷	-0/05	0/10	0/99	-1490*	17/59	-0/09	0/18	0/97	-517	0/80	-542*
مرحله ۸	-0/05	0/10	0/99	-1461*	19/37	-0/13	0/25	0/94	-382	-34/10	-401*

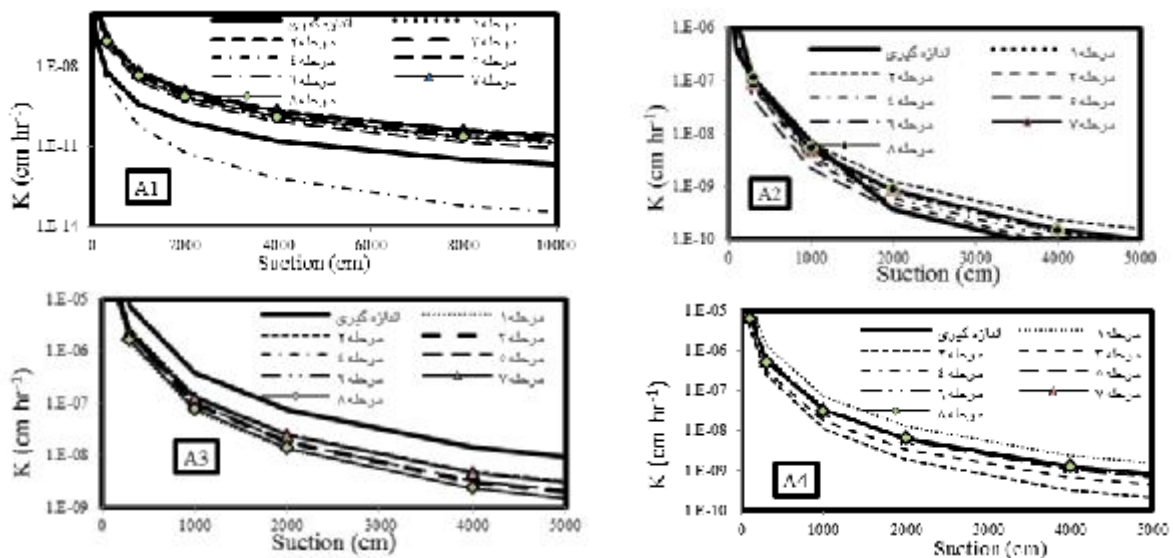
**ورودی هر مدل در جدول 2 و علامت اختصاری متغیرها در زیر جدول 2 آمده است.

*نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (در سطح 5 درصد) با مدل 1 بر پایه معیار اطلاعات آکایک و در ستون AIC_{A-R} نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (در سطح 5 درصد) بین دو روش است.

جدول 6- مدل‌ها و ضرایب رگرسیون به دست آمده با روش رگرسیون برای پارامترهای α و n مدل ون گنوختن.

مراحل	خروجی	مدل‌ها و ضرایب
1 مرحله**	α	$\exp(-3/598 \times C - 1/645 \times Si/S + 0/944 \times BD - 10/352)$
	n	$0/436 \times C - 0/209 \times Si/S + 0/05 \times BD - 0/19$
2 مرحله	α	$\exp(0/141 \times C - 0/208 \times Si/S + 0/217 \times BD - 0/031 \times LL + 0/349 \times PL - 0/45 \times SL + 0/046)$
	n	$0/44 \times C - 0/051 \times Si/S - 0/006 \times BD - 0/299 \times LL + 0/32 \times PL + 0/105 \times SL - 0/046$
3 مرحله	α	$\exp(0/096 \times C - 0/228 \times Si/S + 0/082 \times BD - 0/097 \times K_s + 0/058)$
	n	$\exp(4/802 \times C - 5/131 \times Si/S + 2/969 \times BD - 1/476 \times K_s - 19/993)$
4 مرحله	α	$\exp(1/542 \times C + 3/464 \times Si/S + 1/573 \times BD - 5/244 \times CaCO_3 - 2/234 \times OC - 9/389)$
	n	$0/459 \times C - 0/255 \times Si/S + 0/092 \times BD + 0/144 \times CaCO_3 + 0/054 \times OC - 0/11$
5 مرحله	α	$0/081 \times C - 0/12 \times Si/S + 0/11 \times BD - 0/084 \times CEC + 0/061$
	n	$\exp(2/634 \times C - 1/909 \times Si/S + 1/699 \times BD - 2/493 \times CEC - 11/414)$
6 مرحله	α	$0/06 \times C - 0/184 \times Si/S + 0/132 \times BD + 0/162 \times PR + 0/052$
	n	$0/443 \times C - 0/201 \times Si/S + 0/049 \times BD - 0/058 \times PR - 0/017$
7 مرحله	α	$0/069 \times C - 0/171 \times Si/S + 0/152 \times BD + 0/067 \times \theta_s + 0/061$
	n	$0/451 \times C - 0/194 \times Si/S + 0/016 \times BD - 0/101 \times \theta_s - 0/24$
8 مرحله	α	$0/126 \times C - 0/106 \times Si/S + 0/112 \times BD - 0/203 \times TS + 0/053$
	n	$\exp(4/679 \times C + 2/71 \times Si/S + 3/18 \times BD + 1/771 \times TS - 15/583)$

** ورودی هر سطح در جدول 2 و علامت‌های اختصاری در زیر جدول 2 آمده است.



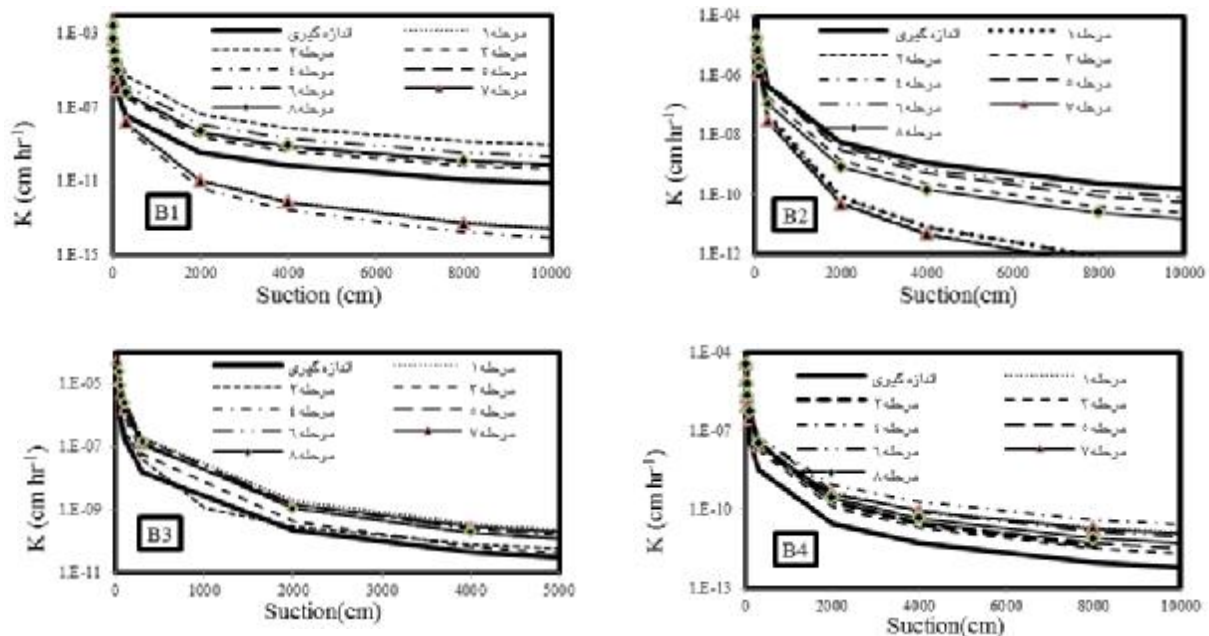
شکل 3- مقایسه منحنی برآورد شده هدایت هیدرولیکی غیراشباع از روی SWRC با منحنی‌های برآوردی توسط توابع مختلف با روش شبکه عصبی مصنوعی برای 4 نمونه خاک.

نتیجه‌گیری کلی

توزیع اندازه منافذ خاک هستند. در واقع نتایج حاصله نشان داد که متغیرهای ورودی استفاده شده در این تحقیق موجب بهبود دقت تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع شدند. از بین توابع انتقالی ایجاد شده توابع مرحله 8 که از مقاومت کششی به همراه خصوصیات

استفاده از پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی موجب کاهش معنی‌دار خطای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک (پارامترهای مدل ون گنوختن - معلم) در هر دو مرحله آموزش و آزمون گردید. چرا که این پارامترها تابعی از بافت، ساختمان و

پایه خاک به عنوان ورودی استفاده کردند بهترین نتایج را نشان دادند.



شکل 4- مقایسه منحنی برآورد شده هدایت هیدرولیکی غیراشباع از روی SWRC با منحنی‌های برآوردی توسط توابع مختلف با روش رگرسیون برای 4 نمونه خاک.

از رطوبت حجمی اشباع به عنوان تخمین‌گر موجب بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی گردید. پارامترهایی که تغییرپذیری کمی دارند مانند ظرفیت تبادل کاتیونی نتوانستند به اندازه پارامترهایی که تغییرپذیری بالایی دارند مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، مقاومت کششی و مقاومت فروری برآورد هدایت هیدرولیکی را بهبود دهند. احتمالاً پارامتری که تغییرپذیری بالایی داشته باشد می‌تواند تغییرپذیری بالای هدایت هیدرولیکی غیراشباع را پوشش دهد.

استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع به همراه خصوصیات پایه به عنوان تخمین‌گر باعث بهبود تخمین هدایت هیدرولیکی شد. احتمالاً علت آن وجود همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامتر α و n مدل ون-گنوختن بود. با توجه به نتایج مرحله 7 تغییرات رطوبت حجمی اشباع با تغییرات پارامترهای α و n مدل ون-گنوختن همسو بود. زیرا در حالت اشباع منافذ درشت که بیشترین تأثیر را بر هدایت هیدرولیکی و پارامترهای α و n مدل ون-گنوختن دارند از آب اشباع بوده و پیوستگی بین منافذ به بیشینه می‌رسد. بنابراین استفاده

منابع مورد استفاده

امامی ح، شرفا م و نیشابوری م، 1391. ارزیابی هدایت هیدرولیکی نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی به عنوان مرجع در برخی مدل‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، جلد 59، سال 16، صفحه‌های 162 تا 189.

بیات ح، صداقت آ، دواتگر ن و صفری سنجانی ع، 1393. کاربرد پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های ریز در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های استان گیلان. پژوهش‌های خاک، جلد 28، شماره 2، صفحه‌های 447 تا 458.

عباسی ف، 1386. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. 250 صفحه.

بیات ح، ابراهیمی ع، راستگو م، زارع ابیانه ح و دواتگر ن، 1392. برازش مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب خاک بر داده‌های تجربی در کلاس‌های بافتی متفاوت استان گیلان. نشریه دانش آب و خاک، جلد 23، شماره 3، صفحه‌های 151 تا 167.

قنبریان علویجه ب و عباسی ف، 1389. بررسی تأثیر پارامتر پیوستگی منافذ و ارایه مدلی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک. مجله پژوهش آب در کشاورزی، جلد 24، شماره 1، صفحه‌های 51 تا 63.

طاحونی ش. 1387. اصول مهندسی ژئوتکنیک (جلد اول - مکانیک خاک) - ترجمه. نویسنده: برآجا ام. داس، چاپ 17، انتشارات موسسه انتشاراتی پارس آیین.

Abedin MZ and Hettiaratchi DRP, 2002. SW-Soil and Water: State parameter interpretation of cone penetration tests in agricultural soils. *Biosystems Engineering* 83: 469-479.

Agyare WA, Park SJ and Vlek PLG, 2007. Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone Journal* 6: 423-431.

Akaike H, 1974. New look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19: 716-723.

Anonymous, 1975. *Methods for Testing Soil for Civil Engineering Purposes*. British Standard Institution 1377, London 134p.

Baker D and Ayers P, 1990. A wetting front arrival time probe. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 33: 138-144.

Benson C, Zhai H and Wang X, 1994. Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 120: 366-387.

Bayat H, Neyshaburi MR, Mohammadi K, Nariman-Zadeh N and Irannejad M, 2013. Improving water content estimations using penetration resistance and principal component analysis. *Soil and Tillage Research* 129: 83-92.

Benson CH and Trast J, 1995. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. *Clays and Clay Minerals* 43: 669-681.

Bouma J, 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science* 9: 177-213.

Bruand A and Tessier D, 2000. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science* 51: 679-688.

Carsel RF and Parrish RS, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24: 755-769.

Causarano H, 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and Tillage Research* 28: 15-25.

Dexter A, Czyż EA and Gałę OP, 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research* 93: 412-419.

Dexter AR, Czyz EA and Gate OP, 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research* 79: 185 - 189.

Dexter AR and Watts CW, 2001. Tensile Strength and Friability. Pp. 405-434. In: Smith KA and Mullins CE, (eds). *Soil and Environmental Analysis*. Marcel Dekker, Inc. New York.

Doai M, Shabanpour-e-shahrestani M and Bagheri F, 2005. Modelling of saturated hydraulic conductivity of Gilan Province involving Artificial Neural Networks. *The Agricultural Science Research* 6: 41-48

Emerson W, Greenland DJ, Boodt MD, Hayes MHB and Herbillon A, 1990. Soil aggregates-formation and stability. *Soil colloids and their associations in aggregates*, Plenum Press 485-511.

Farrell DA, Greacen EL and Larson WE, 1967. The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression. *Soil Science Society of America Journal* 31: 445-450.

Foley J, Tolmie PE and Silburn DM, 2006. Improved measurement of conductivity on swelling clay soils using a modified disc permeameter method. *Soil Research* 44:701-710.

Gee GW and Or D, 2002. Particle- Size analysis. Pp. 225-295. In: Warren AD, (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc.

Grossman RB and Reinsch TG, 2002. Bulk density and linear extensibility. Pp. 201-228. In: Warren AD, (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc.

Guerif J, 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil and Tillage Research* 16: 167-178.

- Hillel D, 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, Inc. (London) Ltd.
- Hodnett M and Tomasella J, 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma* 108: 155-180.
- Horn R and Dexter AR, 1989. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research* 13: 253–266.
- Hudson B, 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil Water Conservation* 49:189–193.
- Hwang SI and Powers SE, 2003. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 4: 1103-1112.
- Hwang SI, Lee KP, Lee DS and Powers SE, 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal* 66:1143-1150.
- Igwe CA and Udegbunam ON, 2008. Soil properties influencing water dispersible clay and silt in an Ultisol in Southern Nigeria. *International Agrophysics* 22: 319-325.
- Jarvis NJ, Zavattaro L, Rajkai K, Reynold WDS, Olsen PA, McGechan M, Mecke M, Mohanty B, Leeds-Harrison PB and Jacques D, 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma* 108:1–17.
- Jong Ed, Acton DF and Stonehouse HB, 1990. Estimating the Atterberg limits of southern Saskatchewan soils from texture and carbon contents. *Canadian Journal of Soil Science* 70: 543-554.
- Kay B and Dexter A, 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth. *Soil Research* 30: 297-310.
- Klute A and Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. Pp. 687–734. In: Klute A, (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1 Soil Science Society of America Journal. Inc., Wisconsin, USA.
- Manrique LA, Jones CA and Dyke PT, 1991. Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal* 55: 787-794.
- Minasny B, Hopmans JW, Harter T, Eching SO, Tuli A and Denton MA, 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Science Society of America Journal* 68: 417-429.
- Minasny B and McBratney A, 2007. The method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 66: 352-36
- Mishra S, Parker JC and Signal N, 1990. Estimation of soil hydraulic conductivity properties and their uncertainty from particle size distribution data. *Journal of Hydrology* 108: 1-18.
- Mohanty B, Ankeny MD, Horton R and Kanwar RS, 1994. Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using disc infiltrometers. *Water Resources Research* 30: 2489-2498.
- Mosaddeghi MR and Mahboubi AA, 2011. Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-arid region of western Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 57: 327-342.
- Mualem Y, 1976. *A Catalogue of the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Technion Israel Institute of Technology, Technion Research & Development Foundation 100 p.
- Nemes A, Rawls WJ and Pachepsky YA, 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1330-1337.
- Nemes A and Rawls WJ, 2006. Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma* 132: 47-58.
- 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: 727-733.
- Perumpral JV, Grisso RD and Desai CS, 1983. A soil-tool model based on limit equilibrium analysis [Mathematical, tillage tool performance in soils]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 4: 991- 995.
- Rasse DP, Smucker AJM and Santos D, 2000. Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 64: 725-731.
- Rawls W and Pachepsky YA, 2002. Soil consistence and structure as predictors of water retention. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1115-1126.
- Rawls WJ, Brakensiek CL and Saxton KE 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 25: 1316-1328
- Saxton K, Rawls WJ, Romberger JS and Papendick RI, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1031-1036.
- Sedaghat A, Bayat H and Safari Sinigani AK, 2016. Estimation of soil saturated hydraulic conductivity by artificial neural networks ensemble in smectite soils. *Eurasian Soil Science* 49 (3): 347–357
- Schaap MG and Leij FJ, 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research* 47: 37-42.

- Sims JT, Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT and Sumner ME, 1996. Lime requirement, Pp. 491-515. In: Sparks DL, (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*. Soil Science Society of America Inc.
- Simunek J and Van Genuchten MT, 1997. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension disc infiltrometer data. *Soil Science* 162: 383-398.
- Sumner ME and Miller WP, 1996. Cations exchange capacity and Exchange Coefficients. Pp. 1201-1230. In: Sparks DL,(ed). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Tamari S, Wösten JHM and Ruiz-Suarez JC, 1996. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1732-1741.
- Tietje O and Tapkenhinrichs M, 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1088-1095.
- Tomasella J, Pachepsky Y, Crestana S and Rawls WJ, 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1085-1092.
- Van Genuchten MT, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- Vaz CM, Bassoi LH and Hopmans JW, 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer–TDR probe. *Soil and Tillage Research* 60: 35-42.
- Vepraskas M, 1984. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1220-1225.
- Vereecken H, Maes J, Feyen J and Darius P, 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science* 148: 389-403.
- Walczak R, Witkowska-Walczak B and Sławiński C, 2004. Pedotransfer studies in Poland. *Developments in Soil Science* 30: 449-463.
- Walkley A and Black IA, 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Wosten JHM, 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality, Pp. 221-245. In: Gregorich EG and Carter MR, (eds). *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. *Developments in Soil Science*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.