

## اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد مقاومت فروروی، پایداری خاکدانه و پارامترهای مدل منحنی رطوبتی ون گنوختن در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل

شکراه اصغری<sup>1\*</sup>، اسماعیل روزبان<sup>2</sup>، حبیب خداوردیلو<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 93/04/23 تاریخ پذیرش: 94/02/19

<sup>1</sup> - دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

<sup>2</sup> - دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

<sup>3</sup> - دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [shasghari@uma.ac.ir](mailto:shasghari@uma.ac.ir)

### چکیده

اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک وقت‌گیر، هزینه‌بر و گاهی اوقات به دلیل خطاهای آزمایشی و عدم یکنواختی خاک غیرواقعی است. از دیگر سوی، این ویژگی‌ها را می‌توان از روی ویژگی‌های زودیافت با استفاده از توابع انتقالی (PTFs) خاک برآورد نمود. هدف از این پژوهش ارائه مدل‌های رگرسیونی بر اساس متغیرهای مستقل شامل شن، سیلت، رس، میانگین ( $d_g$ ) و انحراف استاندارد ( $\delta_g$ ) هندسی قطر ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) و حقیقی، تخلخل کل، آبگریزی، رطوبت اولیه ( $P_m$ )، کربن آلی (OC) و کربنات کلسیم معادل ( $CaCO_3$ ) برای برآورد متغیرهای وابسته شامل: مقاومت فروروی (PR)، میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD)، برخی نقاط منحنی نگهداری آب خاک (SWRC)، شیب در نقطه عطف ( $S_p$ )، پارامترهای  $a$  و  $n$  مدل ون گنوختن بود. در کل 75 نمونه خاک از جنگل‌های فندقلوی اردبیل برداشته شد سپس نمونه‌ها به صورت تصادفی به دو سری شامل 60 داده برای آموزش و 15 داده برای آزمون مدل‌ها تقسیم شدند. بر اساس آماره‌های ضریب همخوانی ( $d$ )، میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توازن خطا - واریانس (BVTO) بهترین تابع انتقالی برای تخمین رطوبت اشباع با متغیرهای ورودی OC،  $D_{b-rel}$  و  $CaCO_3$  به دست آمد. همچنین بهترین توابع انتقالی برای تخمین PR با متغیرهای ورودی  $CaCO_3$ ،  $D_{b-rel}$  و  $d_g$  برای MWD با متغیرهای ورودی نسبت رس به سیلت، OC و  $D_{b-rel}$  به دست آمدند. نتایج نشان داد که 79 درصد تغییرات شاخص کیفیت فیزیکی ( $S_p$ ) در خاک جنگلی مورد مطالعه بر اساس متغیرهای  $CaCO_3$  و  $D_{b-rel}$  قابل تبیین است.

واژه‌های کلیدی: آبگریزی، خاک جنگلی، رگرسیون، کیفیت فیزیکی

## Derivation of Pedotransfer Functions for Estimating Penetration Resistance, Aggregate Stability and Parameters of van Genuchten Moisture Curve Model in Fandoglou Forest Lands of Ardabil

Sh Asghari<sup>1\*</sup>, E Roozban<sup>2</sup>, H Khodaverdiloo<sup>3</sup>

Received: 14 July 2014 Accepted: 9 January 2016

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Tech. and Natural Res., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran

<sup>2</sup> Former M.Sc. Student, Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Tech. and Natural Res., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Dept. of Soil Sci., Univ. of Urmia, Iran

\* Corresponding Author, Email: [shasghari@uma.ac.ir](mailto:shasghari@uma.ac.ir)

### Abstract

Direct measurement of soil hydraulic and mechanical properties is time consuming, costly and sometimes unreliable due to soil heterogeneity and experimental errors. On the other hand, these properties can be estimated from readily available soil properties using pedotransfer functions (PTF<sub>s</sub>). This research describes regression based PTF<sub>s</sub> to predict dependent soil properties including penetration resistance (PR), mean weight diameter of aggregates (MWD), some points of soil water retention curve (SWRC), its slope at the inflection point (S<sub>p</sub>), the van Genuchten *a* and *n* parameters from independent soil properties including sand, silt, clay, geometric mean (d<sub>g</sub>) and standard deviation (δ<sub>g</sub>) of the soil particles diameter, relative bulk (D<sub>b-rel</sub>) and particle density (D<sub>p</sub>), total porosity (n), water repellency (WR), initial water content (P<sub>m</sub>), organic carbon (OC) and equivalent calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>). Totally, 75 soil samples were taken from Fandoglou forest lands of Ardabil, Iran. Then they were randomly divided in two sets for training (60 data) and testing (15 data) the derived models. The best PTF for estimating the saturated water content (q<sub>s</sub>) was obtained with input variables of OC, D<sub>b-rel</sub> and CaCO<sub>3</sub> according to the coefficient of agreement (d), mean error (ME), root mean square error (RMSE) and bias-variance trade-off (BVTO) statistics. Also, the best PTF<sub>s</sub> for estimating the PR were obtained with input variables of P<sub>m</sub>, D<sub>b-rel</sub>, d<sub>g</sub> and CaCO<sub>3</sub> and for MWD with input variables of clay to silt ratio, OC and D<sub>b-rel</sub>. The results showed that in the studied forest soil, 79 percent of the physical quality index (S<sub>p</sub>) variations were determined by D<sub>b-rel</sub> and CaCO<sub>3</sub> variables.

**Keywords:** Forest soil, Physical quality, Regression, Water repellency

متأسفانه بیشتر این روش‌ها خیلی وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشند (مردون 2010). علاوه بر این به دلیل تغییرپذیری زمانی و مکانی بالای این ویژگی‌ها، تعداد زیادی از نمونه خاک مورد نیاز هستند (مینانسی و مک-

مقدمه

روش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای متداول زیادی جهت اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات دیرریافت فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیکی خاک در دسترس است.

در پیش‌بینی مقدار رطوبت خاک‌های آهکی تأثیر زیادی ندارد.

قربانی دشتکی و همکاران (2011) امکان استفاده از میانگین هندسی<sup>4</sup> ( $d_g$ ) و انحراف استاندارد<sup>5</sup> هندسی قطر ذرات خاک ( $\delta_g$ ) به جای توزیع اندازه ذرات خاک برای اشتقاق توابع انتقالی رگرسیونی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در قسمت خشک منحنی نگهداری آب خاک،  $d_g$  و  $\delta_g$  مقادیر رطوبت را بهتر از جرم مخصوص ظاهری خاک پیش‌بینی می‌کند.

علی‌جان‌پور شلمانی و همکاران (1390) پایداری خاکدانه‌ها را با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی در خاک‌های جنگلی استان گیلان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد بر اساس آماره‌های ضریب تبیین تصحیح‌شده<sup>6</sup> ( $R_{adj}^2$ )، ریشه دوم میانگین مربعات خطا<sup>7</sup> (RMSE) و برتری نسبی، مدل با متغیرهای ورودی pH، جرم مخصوص حقیقی، سیلت و مقاومت فروروی<sup>8</sup> (PR) خاک، بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد میانگین هندسی قطر<sup>9</sup> خاکدانه‌ها در داده‌های مورد آزمایش شناخته شد.

بیات و همکاران (1392) گزارش کردند که استفاده از پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک موجب بهبود تخمین نقطه‌ای منحنی نگهداری آب خاک نگردید ولی استفاده از پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاک‌دانه‌های ریز به علت تأثیر ساختمان خاک در نگهداری رطوبت موجب بهبود معنی‌دار تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف گردید و میزان RMSE را در مرحله اعتبارسنجی تا 6/5 درصد بهبود بخشید.

رضضانی و همکاران (1390) از پارامترهای  $d_g$  و  $\delta_g$ ، نسبت جذب سطحی سدیم، هدایت الکتریکی، آهک،

برانتی (2002). روش‌های غیرمستقیم به‌عنوان راهکاری مناسب برای رفع نسبی این مشکلات و به‌عنوان یک جایگزین برای اندازه‌گیری مستقیم ارائه شده‌اند که در آن خصوصیات دیریافت از داده‌های زودیافت خاک برآورد می‌شوند (بوما 1989). روش‌هایی که برای این اهداف ممکن است استفاده شوند شامل مدل‌های آماری توزیع اندازه منافذ، مدل‌های معکوس<sup>1</sup> و مخصوصاً توابع انتقالی (PTFs)<sup>2</sup> خاک هستند (شوآپ و همکاران 2001).

ژیانگ شنگ<sup>3</sup> و همکاران (2013) سه روش رگرسیون خطی چندگانه، شبکه عصبی مصنوعی و مدل Rosetta (شوآپ و همکاران 2001) را جهت توسعه توابع انتقالی برای برآورد رطوبت‌های اشباع و ظرفیت مزرعه‌ای مقایسه کردند. نتایج نشان داد که هر سه روش، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای را با دقت بالاتری در مقایسه با رطوبت اشباع برآورد نمودند.

براهیم و همکاران (2012) از یک روال گام به-گام روش رگرسیون خطی چندگانه برای پیش‌بینی جرم مخصوص ظاهری با استفاده از خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد که کربن آلی، رس، رس درشت و pH عوامل اصلی در تخمین جرم مخصوص ظاهری بودند.

خداوردی‌لو و همکاران (2011) تأثیر مقدار آهک ( $CaCO_3$ ) را در توابع انتقالی خاک برای پیش‌بینی منحنی نگهداری آب خاک و نیز پارامترهای مدل ون‌گونوختن (1980) در خاک‌های آهکی با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه بررسی کردند. نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری در تخمین نگهداری آب و پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل ون‌گونوختن (1980) بین توابع انتقالی دارای آهک و بدون آهک وجود ندارد و مدل Rosetta (شوآپ و همکاران 2001)

4- Geometric mean

5- Geometric standard deviation

6- Adjusted  $R^2$

7- Root mean square error

8- Penetration resistance

9- Mean geometric diameter

1- Inverse modeling

2- Pedotransfer functions

3- Xiangsheng Yi

برای پیش‌بینی پارامترهای دیریافت خاک وجود ندارد (ژیانگ شنگ و همکاران 2013). به‌علاوه، توابع انتقالی ارائه‌شده در تحقیقات قبلی برای برآورد خصوصیات دیریافت خاک در دیگر نواحی همیشه با دقت قابل قبولی کاربرد ندارند (کرنلیس و همکاران 2001، نمس و همکاران 2003). بر پایه اطلاعات در دسترس، تاکنون توابع انتقالی برای برآورد خصوصیات دیریافت خاک در جنگل‌های فندقلوی اردبیل ارائه نشده است. از سوی دیگر، مشاهدات محلی حاکی از آن است که سطح این جنگل‌ها به‌علت تغییر کاربری به اراضی مرتعی و زراعی توسط ساکنان بومی منطقه و نیز افزایش تعداد و زمان اقامت گردشگران در حال کاهش است لذا ارائه توابع انتقالی خاک به‌منظور بررسی افت احتمالی کیفیت فیزیکی خاک منطقه ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین، اهداف تحقیق حاضر عبارت بودند از: 1) ارائه توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد رطوبت‌های اشباع، ظرفیت مزرع‌ای، پژمردگی دائم و قابل‌استفاده خاک (2) ارائه توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد پارامتر  $\alpha$  و  $n$  در مدل ون گنوختن (1980) و نیز پارامتر شیب منحنی ( $S_p$ ) نگهداری آب خاک در نقطه عطف (دکستر و بیرد 2001) 3) ارائه توابع انتقالی برای برآورد میانگین وزنی قطر<sup>۱۲</sup> (MWD) خاکدانه‌ها و PR خاک در جنگل‌های فندقلوی اردبیل.

### مواد و روش‌ها

#### اندازه‌گیری پارامترها

تعداد 75 نمونه دست‌خورده (با کمترین دست‌خوردگی و احتیاط کامل) و دست‌نخورده (با استفاده از استوانه‌های فولادی به قطر و ارتفاع 5cm) از لایه 0 تا 15 سانتی‌متری خاک جنگل‌های فندقلوی اردبیل برداشته شد. نمونه‌های دست‌خورده در آزمایشگاه هوا خشک گردید سپس بخشی از آن خرد شده و از الک 2 mm عبور داده شد. بافت خاک (درصد‌های شن، سیلت و رس) به‌روش هیدرومتری 4 قرائته (گی و اور 2002)،

جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی، رس، سیلت و شن به‌عنوان متغیرهای مستقل و ورودی مدل برای تخمین رطوبت در مکش‌های 10، 33، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال استفاده کردند. مقایسه محک‌های آماری RMSE، میانگین خطا<sup>۱۰</sup> (ME) و ضریب تبیین<sup>۱۱</sup> ( $R^2$ ) نشان داد که توابع انتقالی توسعه‌یافته، رطوبت را در مکش‌های 10، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال به‌طور قابل توجهی بهتر از مدل Rosetta (شوآپ و همکاران 2001) تخمین زدند، اگرچه مدل Rosetta رطوبت را در مکش 33 کیلوپاسکال بهتر از توابع انتقالی در تحقیق نامبردگان پیش‌بینی نمود.

بیات و همکاران (2008) با بررسی 387 نمونه خاک گردآوری‌شده از دو شهر همدان و مراغه، توانستند با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی و به‌کمک پارامترهای جرم مخصوص ظاهری، رطوبت وزنی اولیه مزرعه، تخلخل کل و نسبت رطوبت حجمی اولیه مزرعه به تخلخل کل (درجه اشباع)، PR خاک را برآورد کنند. آن‌ها دریافتند که افزودن پارامترهای تخلخل کل و درجه اشباع نسبی به مدل‌هایی که تنها دو پارامتر جرم مخصوص ظاهری و رطوبت وزنی اولیه مزرعه را دارا بودند، صحت مدل‌ها را بهبود بخشید.

جره و همکاران (1392) گزارش کردند که افزودن پارامترهای فراکتالی، به ورودی‌های مرسوم برآورد کننده PR خاک (جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه خاک مزرعه) باعث بهبود معنی‌دار معیارهای ارزیابی صحت مدل‌های رگرسیونی شد. همچنین به‌کارگیری پارامترهای کیفی ساختمان خاک به‌همراه پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات باعث بهبود معنی‌دار پیش‌بینی PR شد.

اگرچه تحقیقات زیادی برای توسعه و استفاده از توابع انتقالی خاک انجام گرفته است ولی روش فراگیر

<sup>10</sup>- Mean error

<sup>11</sup>- Determination coefficient

<sup>12</sup>- Mean weight diameter

خاک ممکن است همبستگی بهتری با چندین تابع فیزیکی خاک مانند ظرفیت ذخیره آب و هوا و فراهمی آب برای گیاه داشته باشد (عسگرزاده و همکاران 2011). کلیشادی و همکاران (2014) توضیح نسبتاً کاملی در مورد کاستی‌های  $D_b$  و مزیت‌های استفاده از  $D_{b-ref}$  و  $D_{b-rel}$  به جای آن ارائه کرده‌اند. تخلخل کل ( $P$ ) از روی داده‌های جرم مخصوص ظاهری و حقیقی محاسبه شد.

میانگین وزنی قطر (MWD) در خاکدانه‌های کوچک‌تر از 4/75mm به‌روش الک تر (کمپر و روسنو 1986) اندازه‌گیری شد. در این روش از سری الک‌ها با قطر 2، 1، 0/5، 0/25 و 0/106mm استفاده شد.

ضریب آبگریزی<sup>14</sup> (WR) خاک به‌روش زمان نفوذ قطره آب اندازه‌گیری شد (دکر و جانگریوس 1990). نمونه‌های دست‌نخورده به مدت 24 ساعت در دمای  $C^0$  105 آون خشک گردید. بعد از 24 ساعت با استفاده از یک قطره‌چکان دقیق پزشکی، یک قطره آب با حجم مشخص (100 $\mu$ l) به سطح خاک اضافه شد. با استفاده از ذره‌بین و زمان‌سنج، مدت زمان لازم برای نفوذ قطره آب به داخل خاک اندازه‌گیری گردید. این کار برای هر نمونه خاک در پنج تکرار انجام گرفت.

مقاومت فروروی (PR) خاک سطحی مزرعه (0) تا 15 سانتی‌متر) با استفاده از یک دستگاه فروسنج مدل جیبی<sup>15</sup> در 10 تکرار تعیین گردید (گروکو 2006). با توجه به اینکه PR تحت تأثیر رطوبت اولیه خاک مزرعه هست (بوسچر و همکاران 1997) لذا رطوبت اولیه خاک ( $P_m$ ) در موقع اندازه‌گیری PR به روش وزنی اندازه‌گیری شد.

رطوبت خاک در فشارهای صفر، 10، 33 و 100 کیلوپاسکال در نمونه‌های خاک دست‌نخورده و نیز در فشارهای 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال در نمونه‌های خاک دست‌خورده با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و به‌روش وزنی اندازه‌گیری شد (گاردنر 1986).

جرم مخصوص حقیقی ( $D_p$ ) به‌روش پیکنومتر (بلک و هارتگ 1986a)، کربن آلی (OC) به روش اکسیداسیون تر و کربنات کلسیم معادل ( $CaCO_3$ ) به‌روش تیتراسیون با اسید (نلسون و سامرز 1982) اندازه‌گیری شد. پارامترهای میانگین هندسی قطر ( $d_g$ ) و انحراف استاندارد هندسی قطر ( $\sigma_g$ ) ذرات خاک با استفاده از روابط پیشنهادی شیرازی و بورسما (1984) محاسبه گردید.

جرم مخصوص ظاهری<sup>13</sup> ( $D_b$ ) خاک به‌روش استوانه دست‌نخورده (بلک و هارتگ 1986b) اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک است که توصیف‌کننده ساختمان خاک است ولی آن نمی‌تواند معرف دقیق درجه فشردگی خاک برای رشد ریشه گیاه، تولید محصول و دسترسی آب خاک برای گیاه باشد. مقدار مشخصی از  $D_b$  (برای مثال  $1/4 \text{ g cm}^{-3}$ ) ممکن است در یک خاک ریزبافت محدودکننده باشد اما در یک خاک درشت‌بافت بحرانی نباشد (کلیشادی و همکاران 2014). دلیل اصلی آن وابستگی  $D_b$  به بافت، کانی‌شناسی، شکل ذرات و ماده آلی خاک است (کائوفمن و همکاران 2010). در این تحقیق با توجه به مشکلات بیان شده از جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) استفاده شد.

$$D_{b-rel} = \frac{D_b}{D_{b-ref}} \quad [1]$$

جرم مخصوص ظاهری مرجع ( $D_{b-ref}$ ) نیز از روی مقدار رس خاک محاسبه شد (دکستر 2004):

$$D_{b-ref} (\text{g cm}^{-3}) = 1.985 - 0.00857 \text{clay} (\text{kg}100\text{kg}^{-1}) \quad [2]$$

جرم مخصوص ظاهری مرجع ( $D_{b-ref}$ ) محاسبه‌شده با استفاده از معادله فوق، همبستگی قوی با  $D_b$  واقعی خاک مزرعه دارد. در مقایسه با  $D_b$ ، جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) به‌عنوان یک پارامتر کیفیت فیزیکی

14- Water repellency

15- Pocket penetrometer

13- Bulk density

عمل در صورت نرمال نبودن توزیع داده‌ها اجتناب‌ناپذیر هست. آزمون نرمال بودن با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم‌افزار Minitab (ریان و جویئر 1994) برای همه داده‌ها انجام شد. توزیع پارامترهای رس (Clay)، OC،  $D_p$ ، WR،  $d_g$ ،  $\delta_g$ ،  $q_s$ ، MWD،  $S_p$  و PAW غیرنرمال بودند. تبدیل‌های زیر برای نرمال شدن این داده‌ها انجام شد (جدول 1) و در گام‌های بعدی که شامل تجزیه رگرسیون و همبستگی بود، شکل نرمال این پارامترها مورداستفاده قرار گرفت.

جدول 1- روابط به‌کار رفته برای نرمال کردن داده‌های غیر نرمال.

پارامتر	معادله
$d_g$	$d_g^* = \text{Log } d_g$
$\delta_g$	$\delta_g^* = (\text{Log } \delta_g)^{-1}$
OC	$\text{OC}^* = \text{Log OC}$
Clay	$\text{Clay}^* = \text{Clay}^{0.5}$
WR	$\text{WR}^* = \text{WR}^{0.5}$
$D_p$	$D_p^* = D_p^{1.3}$
$q_s$	$q_s^* = \text{Log } q_s$
MWD	$\text{MWD}^* = \text{Log MWD}$
$S_p$	$S_p^* = \text{Log } S_p$
PAW	$\text{PAW}_{10}^* = \text{PAW}^{1.7}$

میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل با استفاده از نرم‌افزار Minitab (ریان و جویئر 1994) تعیین گردید. وقتی بین دو متغیر مستقل همبستگی خطی قوی ( $r > 0.60$ ) مشاهده گردید برای اجتناب از هم‌راستایی چندگانه<sup>20</sup> از هر دوی آن‌ها در یک تابع استفاده نشد. روش رگرسیون خطی چندگانه با بهترین زیرمجموعه از نرم‌افزار آماری Minitab (ریان و جویئر 1994) برای گزینش مناسب‌ترین تابع از متغیرهای مستقل یا زودیافت شامل جرم مخصوص ظاهری نسبی، جرم

رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای<sup>16</sup> (FC) رطوبت معادل فشار 10 کیلوپاسکال (در خاک‌های درشت‌بافت) یا 33 کیلوپاسکال (در خاک‌های متوسط و ریزبافت) و رطوبت پژمردگی دائم<sup>17</sup> (PWP) رطوبت معادل فشار 1500 کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. آب قابل‌استفاده گیاه<sup>18</sup> (PAW) نیز از اختلاف مقدار آب در نقطه FC به‌عنوان حد بالایی و نقطه PWP به‌عنوان حد پایینی محاسبه گردید (بیور و بلک 1992).

پارامترهای منحنی نگهداری آب خاک در مدل ون-گنوختن (1980) شامل  $\alpha$  و  $n$  با استفاده از نرم‌افزار RETC (ون‌گنوختن و همکاران 1991) و با در نظر گرفتن  $m=1-1/n$  از طریق برازش مدل مذکور بر داده‌های منحنی نگهداری آب خاک به دست آمد. لازم به ذکر است در حین برازش، پارامترهای رطوبت اشباع ( $q_s$ ) و رطوبت باقی‌مانده ( $q_r$ ) یا همان رطوبت PWP (واریک 2002) به‌عنوان مقادیر ثابت منظور شدند به‌دلیل اینکه مقادیر اندازه‌گیری شده این پارامترها مطمئن‌تر از مقادیر تخمینی آن‌ها توسط RETC هست. شیب منحنی ( $S_p$ ) نگهداری آب خاک در نقطه عطف<sup>19</sup> نیز با استفاده از پارامترهای مدل ون‌گنوختن (1980) و از طریق معادله 3 محاسبه گردید. رطوبت‌های اشباع و باقی‌مانده به‌صورت نسبت وزنی وارد معادله 3 گردیدند. البته برای سهولت مقایسه از قدر مطلق  $S_p$  در محاسبات استفاده گردید (دکستر و بیور 2001).

$$S_p = - \frac{n(q_s - q_r)}{\frac{2n-1}{n} \left( \frac{q_s - q_r}{q_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 2 \frac{q_r}{q_s}} \quad [3]$$

#### ایجاد و ارزیابی توابع انتقالی

در رگرسیون خطی چندگانه، گام اول در تجزیه و تحلیل داده‌ها، نرمال کردن داده‌ها هست. این

<sup>16</sup>- Field capacity

<sup>17</sup>- Permanent wilting point

<sup>18</sup>- Plant available water

<sup>19</sup>- Inflection point

<sup>20</sup>- Multicollinearity

مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده نیست. یعنی بالا بودن  $R^2$  دلیلی بر پایین بودن خطا نیست (کزاک و همکاران 1996) و لذا در تحقیق حاضر از آن استفاده نشد.

مقادیر RMSE و ME برای داده‌های مورد استفاده در آموزش و آزمون مدل‌های رگرسیونی با استفاده از معادلات 4 و 5 به دست آمد (ویلومت 1981):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\hat{a}_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{n}} \quad [4]$$

$$ME = \frac{\hat{a}_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})}{n} \quad [5]$$

که در آن‌ها،  $Y_{i(p)}$  و  $Y_{i(m)}$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده پارامتر و  $n$  تعداد داده برای پارامتر هست. از لحاظ آماری کمینه مقدار RMSE برابر صفر بوده و زمانی است که مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده پارامتر برابر باشند. هرچقدر مقادیر این آماره کمتر باشد، برآوردهای انجام شده توسط مدل برآوردگر دارای دقت بیشتری خواهد بود. مقادیر مثبت ME نشان می‌دهد که مدل پارامتر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند و مقادیر منفی آن نشان می‌دهد که مدل پارامتر را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. مقادیر  $d$  برای داده‌های مورد استفاده در آموزش و آزمون مدل‌های رگرسیونی با استفاده از معادله 6 به دست آمد (ویلومت 1981):

$$d = 1 - \frac{\hat{a}_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\hat{a}_{i=1}^n [(O_i - \bar{O}) + (P_i - \bar{O})]^2} \quad [6]$$

در معادله فوق،  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده پارامتر است. مقدار  $d$  بین 0 تا 1 تغییر می‌کند و هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد (به 1 نزدیک‌تر باشد) یعنی مقادیر برآورد شده به مقادیر اندازه‌گیری شده

مخصوص حقیقی، کربن آلی، تخلخل کل، آب‌گیری، میانگین و انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات، فراوانی نسبی ذرات و کربنات کلسیم برای برآورد متغیرهای وابسته یا دیر یافت شامل پارامترهای میانگین وزنی قطر خاکدانه، رطوبت‌های اشباع، ظرفیت مزرعه‌ای، پژمردگی دائم و قابل استفاده گیاه، مقاومت فروروی، پارامترهای  $n$  و  $\alpha$  مدل ون‌گنوختن (1980) و شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف به‌کار رفت. برای این منظور به‌طور تصادفی 60 سری از داده‌ها برای آموزش مدل و 15 سری برای آزمون مدل به‌کار رفت. در این روش، نخست متغیر مستقلی که بیشترین مقدار  $R^2$  را با متغیر وابسته مورد نظر به دست می‌دهد، انتخاب شده و اطلاعات مربوط به مدل شامل  $R^2$  تصحیح شده و آماره مالو<sup>21</sup> (رابطه محاسباتی این آماره  $(C_p)$  در مقاله خداوردی‌لو و همکاران (2011) آورده شده است) درج می‌گردد. سپس این روند تا وارد شدن همه متغیرها به مدل ادامه می‌یابد. آماره مالو بازتابی از مجموع مربعات خطاست و هر چه مقدار آن به تعداد متغیرهای مستقل موجود در مدل نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر است (ریان و جویبر 1994). در این پژوهش مدلی که بیشترین مقدار  $R^2$  تصحیح شده و نزدیک‌ترین مقدار آماره مالو به تعداد متغیرهای مستقل موجود در مدل را داشت و یا در مواردی که اختلاف چشم‌گیری بین دو یا چند مدل نبود، مدلی که کمترین تعداد متغیرهای مستقل را دارا بود، برگزیده شد.

به‌منظور مقایسه عملکرد توابع انتقالی رگرسیونی برای پیش‌بینی ویژگی‌های دیر یافت خاک، از آماره‌های RMSE، ME، ضریب هم‌خوانی<sup>22</sup> ( $d$ ) و شاخص توازن خطا - واریانس<sup>23</sup> (BVTO) استفاده گردید. استفاده از ضریب تبیین ( $R^2$ ) در ارزیابی اعتبار مدل‌ها می‌تواند فریبنده باشد و  $R^2$  نزدیک به 1 الزاماً دلالت بر انطباق

<sup>21</sup>- Malu's statistic

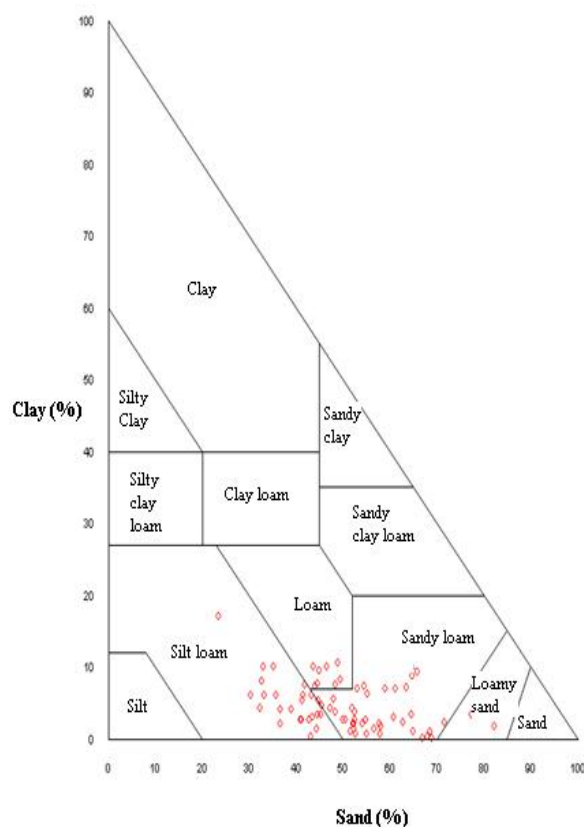
<sup>22</sup>- Coefficient of agreement

<sup>23</sup>- Bias-variance trade-off

در واقع هر تلاشی برای کاستن خطا با افزایش واریانس خطا همراه خواهد بود و بالعکس. لذا، باید توازن بین این دو نیاز متضاد (یعنی خطای کم و واریانس اندک در خطا) برقرار شود تا مناسب‌ترین برآزش به‌دست آید (بتولا و همکاران 2012). در مقایسات مختلف، کمترین مقدار شاخص BVTO بیان‌گر بهترین حالت این توازن است (بتولا و همکاران 2012).

نزدیک‌تر هست. این ضریب یک ملاک نکویی برآزش است و بیان می‌کند که مقادیر برآورد شده تا چه اندازه بدون خطا و هم‌راستا با مقادیر اندازه‌گیری شده هستند. مقایسه نهایی اعتبار مدل‌ها بر اساس BVTO (معادله 7) انجام گردید. برای مقادیر بزرگ تعداد داده (N) مقدار BVTO برابر است با مجموع MD (میانگین مقدار خطا) و  $SDD^2$  (واریانس خطا) (بیکر و الیسون 2008):

$$BVTO = MD^2 + \frac{N-1}{N} SD \quad [7]$$



شکل 1 - توزیع نمونه خاک‌های مورد مطالعه در کلاس‌های مختلف بافت خاک.

## نتایج و بحث

پارامترهای زودیافت و دیریافت مورد استفاده دارای پراکندگی مناسبی هستند. در خاک جنگلی فندقلوی اردبیل همانند سایر خاک‌های جنگلی به‌طور میانگین مقدار کربن آلی بالا (حدود 7 درصد) هست (جدول 2). بالا بودن کربن آلی در این خاک‌ها باعث افزایش

توصیف آماری پارامترهای فیزیکوشیمیایی (جدول 2) و هیدرولیکی (جدول 3) خاک در مجموعه داده‌های آموزش و آزمون که به‌ترتیب برای ایجاد و ارزیابی توابع انتقالی استفاده شدند نشان می‌دهد که



واقع در 240 کیلومتری پایتخت اتیوپی برابر  $0/65 \text{ g cm}^{-3}$  گزارش کردند. میانگین آبریزی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه 72/88 ثانیه (جدول 2) تعیین گردید که با در نظر گرفتن معیار کمی تعیین شدت آبریزی خاک (دکر و جونگریس 1990) این خاک‌ها به علت داشتن ماده آلی زیاد به شدت آبریز هستند.

میانگین آب قابل استفاده (20 درصد حجمی) (جدول 3) و کاهش میانگین جرم مخصوص ظاهری ( $1 \text{ g cm}^{-3}$ ) و حقیقی ( $1/97 \text{ g cm}^{-3}$ ) (جدول 2) در مقایسه با سایر خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک گردید. لمینه و همکاران (2005) نیز مقدار جرم مخصوص ظاهری را برای یک خاک جنگلی با میانگین کربن آلی 7/87 درصد

جدول 2- آماره‌های توصیفی پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزشی و آزمونی.

پارامتر	داده‌های آموزشی			داده‌های آزمونی				
	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار
C (%)	3/47	0/02	17/02	2/77	8/50	6/28	10/59	1/41
Si (%)	45/57	16/16	63/66	10/84	42/44	26/48	57/01	8/72
S (%)	50/96	23/53	82/18	11/97	49/05	32/99	64/7	9/43
OC (%)	6/76	3/08	11/85	2/01	7/29	3/9	11/7	2/61
CaCO <sub>3</sub> (%)	4/82	1/26	15/62	2/40	1/21	0/20	3/52	0/96
D <sub>p</sub> (g cm <sup>-3</sup> )	1/97	1/43	2/47	0/24	2/15	1/98	2/3	0/12
D <sub>b</sub> (g cm <sup>-3</sup> )	1/00	0/45	1/27	0/17	0/84	0/51	1/08	0/15
MWD (mm)	1/026	0/63	1/85	0/28	1/32	1/04	1/8	0/22
P (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0/48	0/33	0/74	0/12	0/60	0/5	0/74	0/06
δ <sub>g</sub> (-)	7/26	4/82	10/24	0/98	9/51	8/81	10/7	0/57
d <sub>g</sub> (mm)	0/16	0/03	0/50	0/09	0/12	0/06	0/21	0/06
WR (s)	72/88	3/00	440	72/93	33/87	6/00	206	6
PR (MPa)	0/37	0/17	0/44	0/05	0/40	0/33	0/44	0/33

C: رس؛ Si: سیلت؛ S: شن؛ OC: کربن آلی؛ CaCO<sub>3</sub>: کربنات کلسیم معادل؛ D<sub>b</sub>: جرم مخصوص ظاهری؛ MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه؛ D<sub>p</sub>: جرم مخصوص حقیقی؛ P: تخلخل کل؛ δ<sub>g</sub>: انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات خاک.

دست آوردند. بر اساس جدول 3، میانگین پارامتر شیب منحنی نگهداری آب خاک در نقطه عطف (S<sub>p</sub>) برای خاک جنگلی مورد مطالعه برابر با 0/08 هست. مطابق طبقه-

نوالفقاری و حاج عباسی (1387) نیز خاک‌های جنگلی لردگان را به شدت آبریز (میانگین آبریزی برابر با 130 ثانیه) گزارش کردند. آن‌ها رابطه همبستگی مثبت بین مواد آلی با شدت آبریزی خاک جنگلی به-

جدول 4 ضرایب همبستگی متغیرهای زودیاقت و دیریاقت خاک را نشان می‌دهد. با اطلاع از همبستگی‌های موجود بین متغیرهای مستقل (زودیاقت) و وابسته (دیریاقت)، بهترین توابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد خصوصیات دیریاقت خاک ایجاد گردیدند که در جدول 5 آورده شده‌اند.

بندی دکستر (2004) این خاک‌ها در کلاس کیفیت فیزیکی خوب ( $S_p > 0/035$ ) قرار می‌گیرند. شکل 1 نشان می‌دهد خاک‌های مورد مطالعه دارای کلاس‌های بافتی لوم شنی، لوم سیلتی، لوم و شن لومی بودند. یعنی خاک‌ها، بافت درشت تا متوسط داشتند.

جدول 3- آماره‌های توصیفی پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزشی و آزمونی.

داده‌های آزمونی				داده‌های آموزشی				پارامتر
انحراف معیار	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	بیشینه	کمینه	میانگین	
8/56	49/46	37/86	48/97	11/25	50/23	27/53	45/22	$P_m$ (% w w <sup>-1</sup> )
0/06	0/81	0/58	0/7	0/05	0/71	0/50	0/59	$q_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
0/04	0/53	0/39	0/44	0/03	0/51	0/33	0/41	$q_{FC}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
0/04	0/32	0/20	0/25	0/04	0/32	0/13	0/22	$q_{pwp}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
0/04	0/27	0/11	0/20	0/04	0/30	0/10	0/20	PAW (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
0/06	0/22	0/02	0/07	0/03	0/19	0/005	0/03	a (cm <sup>-1</sup> )
0/06	1/47	1/28	1/35	0/07	1/64	1/33	1/41	n (-)
0/04	0/21	0/06	0/10	0/03	0/25	0/04	0/08	$S_p$

$P_m$ : رطوبت اولیه خاک مزرعه؛  $q_s$ : رطوبت اشباع؛  $q_{FC}$ : رطوبت ظرفیت مزرعه؛  $q_{pwp}$ : رطوبت نقطه پژمردگی دائم؛ a و n: پارامترهای معادله ونگوختن؛  $S_p$ : شیب منحنی نگهداری آب خاک در نقطه عطف؛ PAW: آب قابل استفاده گیاه.

PR با  $P_m$  توسط بوسچر و همکاران (1997)، بیات و همکاران (2008) و جره و همکاران (1392) نیز گزارش شده است. با توجه به جدول 4 مشاهده می‌شود PR بیشترین میزان همبستگی مثبت و معنی‌دار را با  $D_{b-rel}$  ( $r=0/488^{***}$ ) در مقایسه با سایر متغیرهای ورودی مدل دارد. مقاومت فروروی و جرم خصوص ظاهری هر دو رابطه مستقیم با فشردگی خاک دارند. لی و همکاران (1995) و بیات و همکاران (2008) نیز همبستگی مثبت بین PR و جرم مخصوص ظاهری خاک را گزارش کردند. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین PR با

تابع شماره 1 در جدول 5 نشان می‌دهد که بهترین تابع انتقالی برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک بر اساس متغیرهای زودیاقت رطوبت اولیه وزنی ( $P_m$ )، کربنات کلسیم ( $CaCO_3$ )، جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) و میانگین هندسی قطر ذرات خاک ( $d_g$ ) گزینش گردید. با توجه به تابع 1 مشاهده می‌شود PR با  $P_m$  رابطه منفی ولی با بقیه ورودی‌های مدل رابطه مثبت دارد. همچنین در تحقیق حاضر، ضریب همبستگی پیرسون بین PR با  $P_m$  منفی و معنی‌دار ( $r=-0/434^{**}$ ) به دست آمد. رابطه منفی و معنی‌دار

کردند. درباره رابطه مثبت PR با  $d_g$  نیز شاید بتوان چنین گفت که بالا بودن سهم ذرات شن در مقایسه با سیلت و رس در خاک جنگلی مورد مطالعه (جدول 2) با افزایش  $d_g$  و ایجاد حالت زبری در خاک باعث افزایش PR گردید. فراهانی و همکاران (1391) نیز رابطه مثبت PR با مقدار شن و رابطه منفی آن با مقدار سیلت خاک را گزارش نمودند.

$CaCO_3$  و  $d_g$  یافت شد (جدول 4). نقش مثبت  $CaCO_3$  بر PR خاک شاید به این علت باشد که کربنات کلسیم به-عنوان یک عامل سیمانی کننده بین ذرات خاک عمل کرده و باعث چسبندگی ذرات و در نتیجه افزایش PR خاک می‌شود. فراهانی و همکاران (1391) با اندازه‌گیری PR در برخی خاک‌های استان همدان، اثر افزایشی مقدار کربنات کلسیم بر PR و همچنین روند کاهش‌ی مقادیر PR با افزایش مقدار رطوبت خاک را گزارش

جدول 4- ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای زودبیافت و دیریافت خاک.

پارامتر	$\frac{C}{Si}$	S	OC	$CaCO_3$	$D_p$	$D_{b-rel}$	P	WR	$\delta g$	$d_g$
PR	0/049 <sup>ns</sup>	0/163 <sup>ns</sup>	-0/279*	0/323*	-0/147 <sup>ns</sup>	0/488***	-0/361**	0/082 <sup>ns</sup>	0/071 <sup>ns</sup>	0/292*
MWD	-0/294*	0/111 <sup>ns</sup>	0/481***	0/038 <sup>ns</sup>	0/137 <sup>ns</sup>	-0/357**	0/296*	-0/252 <sup>ns</sup>	-0/279*	0/140 <sup>ns</sup>
q <sub>s</sub>	-0/175 <sup>ns</sup>	-0/012 <sup>ns</sup>	0/327*	-0/312*	0/109 <sup>ns</sup>	-0/779***	0/578***	-0/087 <sup>ns</sup>	-0/151 <sup>ns</sup>	-0/002 <sup>ns</sup>
q <sub>FC</sub>	-0/216 <sup>ns</sup>	0/312*	-0/056 <sup>ns</sup>	0/298*	-0/288*	0/334**	-0/350**	-0/391**	-0/265*	0/254 <sup>ns</sup>
q <sub>PWP</sub>	-0/133 <sup>ns</sup>	0/171 <sup>ns</sup>	0/318*	0/221 <sup>ns</sup>	-0/006 <sup>ns</sup>	0/266*	-0/106 <sup>ns</sup>	-0/224 <sup>ns</sup>	-0/339*	0/117 <sup>ns</sup>
PAW	0/033 <sup>ns</sup>	-0/293*	-0/341*	-0/268 <sup>ns</sup>	-0/027 <sup>ns</sup>	0/060 <sup>ns</sup>	-0/028 <sup>ns</sup>	-0/140 <sup>ns</sup>	0/063 <sup>ns</sup>	-0/260 <sup>ns</sup>
a	-0/042 <sup>ns</sup>	0/228 <sup>ns</sup>	0/432**	0/179 <sup>ns</sup>	0/078 <sup>ns</sup>	-0/480***	0/315*	0/297*	-0/011 <sup>ns</sup>	0/048 <sup>ns</sup>
n	-0/126 <sup>ns</sup>	-0/171 <sup>ns</sup>	-0/232 <sup>ns</sup>	-0/166 <sup>ns</sup>	0/211 <sup>ns</sup>	0/136 <sup>ns</sup>	-0/031 <sup>ns</sup>	-0/263 <sup>ns</sup>	-0/228 <sup>ns</sup>	-0/035 <sup>ns</sup>
S <sub>p</sub>	0/047 <sup>ns</sup>	-0/134 <sup>ns</sup>	0/173 <sup>ns</sup>	-0/437**	0/187 <sup>ns</sup>	-0/815***	0/625***	0/073 <sup>ns</sup>	-0/000 <sup>ns</sup>	-0/234 <sup>ns</sup>

\*, \*\*, و \*\*\* : به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال 5، 1، 0/1 درصد و غیرمعنی‌دار.  $D_{b-rel}$ : جرم مخصوص ظاهری نسبی؛ بقیه علائم در زیر جداول 2 و 3 معرفی شده‌اند.

به شن، MWD خاکدانه‌ها افزایش یافت. مطابق جدول 4 مشاهده می‌شود که OC قوی‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $r=0/481^{***}$ ) را با MWD دارد. شکل 2 (الف) نیز رگرسیون خطی تک‌متغیره رابطه OC با MWD را نشان می‌دهد. اثر مثبت مواد آلی بر خاکدانه‌سازی به-دلیل نقش کلیدی آن در هم‌آوری ذرات خاک هست. تاجیک (1383) پایداری خاکدانه را در برخی مناطق ایران ارزیابی نمود و گزارش کرد که در مجموعه

بر اساس تابع شماره 2 (جدول 5)، در برآورد میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌ها، متغیرهای کربن آلی (OC) و جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) با علامت مثبت و نسبت رس به سیلت  $\frac{C}{Si}$  با علامت منفی وارد مدل گردید. چون مقدار رس در خاک‌های مورد مطالعه بسیار اندک بود (جدول 2) لذا این نسبت توسط سیلت کنترل شده و با افزایش سهم سیلت نسبت

مثال، بوتولا و همکاران (2012)، خداوردی‌لو و همکاران (2011) و علی‌جان‌پور شلمانی و همکاران (1390) نیز گزارش کردند در برخی توابع رگرسیونی اشتقاق یافته علائم متغیرهای مستقل و وابسته، متضاد با روابط ابعادی به‌دست آمد. ایورندلیک و همکاران (2004) رابطه مثبت OC با MWD و رابطه منفی جرم مخصوص ظاهری با MWD را در خاک‌های جنگلی و مرتعی مدیترانه گزارش کردند.

مناطق پایداری خاکدانه‌ها به‌طور عمده متأثر از میزان ماده آلی خاک ( $r=0/723^{**}$ ) بود. علی‌رغم وجود همبستگی منفی بین MWD و  $D_{b-rel}$  (جدول 4) در تابع شماره 2، جرم مخصوص ظاهری نسبی با علامت مثبت وارد گردید. البته گفتنی است که توابع رگرسیونی توابع ابعادی نیستند و نمی‌توان از نوع رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در یک رابطه رگرسیونی برداشت ابعادی کرد ولی می‌توان یک رابطه نظری از قبل موجود را با شواهد رگرسیونی تأیید کرد. به‌طور

جدول 5- توابع انتقالی به‌دست‌آمده بر مبنای ویژگی‌های زود یافت خاک.

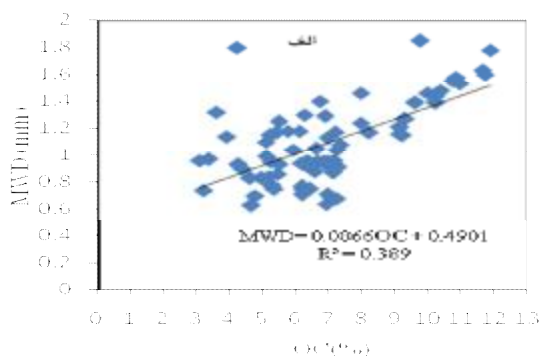
شماره تابع	متغیر دیریافت	معادله رگرسیونی	$R^2_{adj}$
1	PR	$0.429 - 0.00153P_m + 0.00264CaCO_3 + 0.0671D_{b-rel} + 0.0353d_g$	0/24 <sup>**</sup>
2	MWD <sup>*</sup>	$- 0.548 - 0.127 \frac{\partial C}{\partial Si} + 0.428OC + 0.127D_{b-rel}$	0/20 <sup>**</sup>
3	$q_s$ <sup>*</sup>	$- 0.0832 - 0.0105OC - 0.00178CaCO_3 - 0.297D_{b-rel}$	0/51 <sup>***</sup>
4	$q_{FC}$	$0.302 + 0.00184S + 0.163D_{b-rel} - 0.00919WR$	0/42 <sup>***</sup>
5	$q_{PWP}$	$- 0.127 + 0.231OC + 0.302D_{b-rel}$	0/40 <sup>***</sup>
6	PAW <sup>*</sup>	$0.149 - 0.00047S - 0.077OC$	0/14 <sup>*</sup>
7	a	$0.0922 - 0.0773D_{b-rel} + 0.00246WR - 0.115PR$	0/58 <sup>***</sup>
8	n	$1.27 + 0.353PR$	0/05 <sup>*</sup>
9	$S_p$ <sup>*</sup>	$- 0.490 - 0.0170CaCO_3 - 1.11D_{b-rel}$	0/79 <sup>***</sup>

کننده میزان تغییرات متغیر وابسته به‌وسیله متغیرهای مستقل است؛ \*، \*\* و \*\*\*: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال 5، 1 و 0/1 درصد. بقیه علائم در زیر جداول 2 و 3 معرفی شده‌اند.

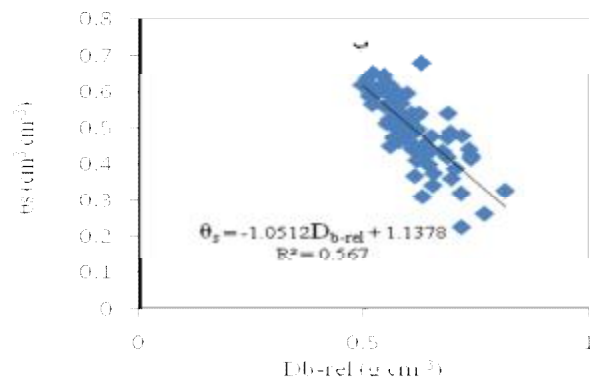
با علامت منفی بودند. بر اساس جدول 4،  $D_{b-rel}$  بیشترین میزان همبستگی منفی و معنی‌دار ( $r=0/779^{***}$ ) را با  $\theta_s$  در خاک جنگلی مورد مطالعه دارد. نمودار

تابع شماره 3 در جدول 5 نشان می‌دهد که در برآورد رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) بهترین گزینش متغیرهای ورودی شامل OC با علامت مثبت و  $CaCO_3$  و  $D_{b-rel}$

زیاد (حدود 3 تا 12 درصد) و در نتیجه افزایش سطح ویژه ذرات خاک در موقع اشباع شدن متورم شده و از استوانه بیرون زدند. وریکن و همکاران (1992) و قربانی دشتکی و همایی (1381) نیز رابطه منفی بین جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع را گزارش کردند. کربن آلی از عوامل قوی مؤثر در خاکدانه‌سازی بوده و با افزایش مقدار آن در خاک به علت افزایش منافذ میکرو (منافذ درون خاکدانه‌ای) مقدار  $\theta_s$  افزایش می‌یابد (واریک 2002). رابطه منفی  $\text{CaCO}_3$  با  $\theta_s$  شاید به دلیل همبستگی مثبت آن با PR (جدول 4) و در نتیجه فشردگی خاک باشد که باعث کاهش حجم کل منافذ خاک و در نتیجه آب نگهداری شده در حالت اشباع گردیده است.



رگرسیون خطی تک‌متغیره رابطه  $\theta_s$  با  $D_{b-rel}$  در شکل 2 (ب) نشان داده شده است. با کاهش جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل خاک افزایش و در نتیجه ظرفیت نگهداری رطوبت خاک در حالت اشباع افزایش پیدا می‌کند. همبستگی مثبت و معنی‌دار  $\theta_s$  با تخلخل کل خاک (جدول 4) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. رطوبت اشباع تقریباً 90 تا 95 درصد تخلخل کل خاک هست (هیمل 2004) البته در خاک‌های متورم شونده مقدار  $\theta_s$  می‌تواند از مقدار تخلخل کل هم بیشتر باشد (قنبریان علویجه و لیاقت 1390). شاید یکی از دلایل بالا بودن بیشینه  $\theta_s$  ( $0/81 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) نسبت به بیشینه تخلخل کل ( $0/74 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) در داده‌های آزمونی (جدول 2) این مسأله باشد. مشاهدات آزمایشگاهی نیز نشان داد برخی نمونه‌های خاک جنگلی به علت داشتن کربن آلی



شکل 2- نمودار رگرسیون خطی تک‌متغیره روابط کربن آلی (OC) با میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) (الف) و رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) با جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) (ب).

رطوبت جذب سطحی و بنابراین کاهش نگهداری رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه شده است. علامت مثبت  $D_{b-rel}$  در تابع 4 را می‌توان به همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $r=0/334^{**}$ ) آن با  $\theta_{FC}$  ربط داد (جدول 4). به نظر می‌رسد با افزایش  $D_{b-rel}$  به دلیل فشردگی خاک، سهم منافذ ریزخاک در مقایسه با منافذ درشت افزایش و در نتیجه آب نگهداری شده در نقطه FC افزایش یافت. خداوری‌لو و همکاران (2011) نیز گزارش کردند در تابع انتقالی اشتقاق یافته برای برآورد  $\theta_{FC}$  در خاک‌های با کلاس بافتی متنوع، متغیر ورودی  $D_b$  با علامت مثبت

با توجه به تابع شماره 4 (جدول 5) مشاهده می‌شود متغیرهای  $D_{b-rel}$  و شن (S) با علامت مثبت و متغیر آبگریزی خاک (WR) با علامت منفی در برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه ( $\theta_{FC}$ ) وارد مدل گردیدند. به دلیل کربن آلی بالای خاک منطقه مورد مطالعه، WR بیشترین همبستگی منفی ( $r=-0/391^{**}$ ) را با  $\theta_{FC}$  دارد (جدول 4). به نظر می‌رسد وجود مواد چرب و آبگریز باعث دفع آب از سطح ذرات خاک شده است. چون بخشی از رطوبت ظرفیت مزرعه شامل رطوبت جذب سطحی شده ذرات خاک است، در نتیجه آبگریزی ذرات خاک باعث کاهش

(1980) رابطه منفی با جرم مخصوص ظاهری نسبی ( $D_{b-rel}$ ) و مقاومت فروروی خاک (PR) دارد. پارامتر  $a$  عکس مکش ورود هوا در خاک می‌باشد (ون‌گنوختن و همکاران 1991). لذا با افزایش  $D_{b-rel}$  و PR به دلیل فشردگی خاک‌های درشت و متوسط بافت مورد مطالعه، منافذ خاک ریزتر شده و مکش ورود هوا در خاک افزایش و عکس آن یعنی  $a$  کاهش می‌یابد. رابطه مثبت  $a$  با آگریزی خاک (WR) را شاید بتوان به افزایش کربن آلی خاک و تأثیر آن بر افزایش قطر درشت‌ترین منفذ نسبت داد. البته تأثیر مثبت WR بر  $a$  با توجه به ضریب کوچک این متغیر ورودی ناچیز می‌باشد. اصغری و همکاران (1390) گزارش کردند که افزودن مواد آلی به یک خاک درشت بافت از طریق کاهش قطر درشت‌ترین منفذ و در نتیجه افزایش مکش ورود هوا به خاک باعث کاهش پارامتر  $a$  نسبت به نمونه شاهد گردید.

با توجه به تابع شماره 8 (جدول 5) مشاهده می‌شود تنها متغیر ورودی در برآورد پارامتر  $n$  وان-گنوختن (1980) PR می‌باشد. البته بر اساس آماره  $R^2_{adj}$  در خاک جنگلی مورد مطالعه فقط 5 درصد تغییرات پارامتر  $n$  به PR وابسته بوده (جدول 5) و 95 درصد تغییرات آن به سایر متغیرهای خاک بستگی دارد. تغییر توزیع اندازه منافذ روی قسمت میانی منحنی رطوبتی تأثیر گذاشته و در نتیجه مقدار پارامتر  $n$  در مدل ون‌گنوختن (1980) را تغییر می‌دهد (ون‌گنوختن و همکاران 1991). حق‌وردی و همکاران (1390) نیز در تخمین پارامترهای  $a$  و  $n$  مدل ون‌گنوختن (1980) با ورودی‌های مختلف شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و مقایسه آن با توابع نقطه‌ای و شبه پارامتریک به این نتیجه رسیدند که توابع شبه پارامتریک بهترین نتایج را نسبت به توابع نقطه‌ای و پارامتریک دارند.

وارد گردید. تفسیر فیزیکی برای رابطه مثبت شن با  $\theta_{FC}$  در تحقیق حاضر یافت نشد.

بر اساس تابع شماره 5 (جدول 5) می‌توان استنباط نمود که با افزایش کربن آلی در خاک منطقه مورد مطالعه به علت بالا رفتن سطح ویژه ذرات خاک، آب جذب سطحی شده و در نتیجه رطوبت نقطه پژمردگی دائم ( $q_{PWP}$ ) افزایش یابد. همچنین رابطه مثبت  $D_{b-rel}$  با  $q_{PWP}$  را شاید بتوان به پایین بودن رس خاک (جدول 2) و در نتیجه کاهش رطوبت جذب سطحی شده نسبت داد. چون طبق معادله‌های 1 و 2 با کاهش رس، جرم مخصوص ظاهری مرجع ( $D_{b-ref}$ ) افزایش و  $D_{b-rel}$  و  $q_{PWP}$  هر دو کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های خداوری‌لو و همکاران (2011) در یک راستا می‌باشد که آن‌ها نیز رابطه مثبت  $q_{PWP}$  با  $D_b$  را به دست آوردند. بوتولا و همکاران (2012) نیز فهرستی از توابع انتقالی ارائه شده توسط محققان مختلف را ارائه کردند که در آن‌ها رابطه مثبت  $q_{PWP}$  با  $D_b$  مشهود است.

در تابع شماره 6 (جدول 5)، کربن آلی با ضریب منفی وارد مدل برآورد آب قابل استفاده (PAW) شده است. همبستگی منفی OC با PAW شاید به دلیل تأثیر بیشتر کربن آلی در حد پایین محدوده آب قابل استفاده گیاه یعنی  $q_{PWP}$  نسبت به حد بالایی آن یعنی  $q_{FC}$  باشد. همانطور که در جدول 4 نیز مشاهده می‌شود در خاک جنگلی مورد مطالعه همبستگی OC با  $q_{PWP}$  مثبت و معنی‌دار ( $r=0/318^*$ ) ولی همبستگی OC با  $q_{FC}$  احتمالاً به دلیل بالا بودن سهم ذرات شن معنی‌دار نشد. وجود شن به دلیل سطح ویژه کم و ایجاد منافذ درشت اثر منفی در نگهداری آب خاک و در نتیجه آب قابل استفاده گیاه دارد به همین دلیل در تابع 6 شن رابطه منفی با PAW پیدا کرده است. فرخیان فیروزی و همایی (1384) نیز رابطه منفی شن را با آب قابل استفاده گیاه گزارش کردند.

با توجه به تابع شماره 7 در جدول 5 مشاهده می‌شود که پارامتر  $a$  در مدل ون‌گنوختن

از دقت تخمین بیشتری نسبت به بقیه برخوردار است. اگرچه بر اساس داده‌های آزمونی (جدول 6)، تابع  $q_{FC}$  (تابع شماره 4) به علت داشتن بیشترین مقدار  $d$  (0/5413) و کمترین مقادیر RMSE و BVTO (به ترتیب  $0/035$  و  $0/0012 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) دارای دقت تخمین بیشتری در مقایسه با سایر نقاط منحنی نگهداری آب خاک می‌باشد. زمانی که مدل‌ها آزمون می‌شوند اگر مدل خاصی در آموزش قوی‌تر است الزامی نیست در آزمون نیز همان مدل، قوی‌ترین مدل باشد چون آزمون مدل‌ها در تشخیص روابط بین داده‌هایی که قبلاً مشاهده نشده است به کار می‌رود (رضائی و سلطانی 1377، علی جان‌پور شلمانی و همکاران 1390). امیرعابدی و همکاران (1392) بهترین مدل رگرسیونی برای تخمین  $\theta_s$  در خاک‌های دشت اردبیل را مدل با پارامترهای ورودی کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، شن و سیلت معرفی کردند. نامبردگان مقادیر  $R^2$ ، RMSE و ME را برای مدل مذکور به ترتیب 0/82، 2/29، 0/01 و 0/01 در مرحله آموزش و 0/93، 3 و 1/71 در مرحله آزمون گزارش کردند.

به طور کلی با توجه به توابع 3، 4 و 5 در جدول 6 مشاهده می‌شود که در مورد نقاط منحنی رطوبتی با افزایش مکش، دقت توابع انتقالی رگرسیونی (بر اساس داده‌های آموزشی) در برآورد رطوبت کاهش یافته است که با نتایج محققان دیگر نظیر مصدقی و محبوبی (2011)، سالشو و همکاران (1996) و شیرانی و رفیع‌نژاد (1390) مطابقت دارد. آب نگهداری شده در مکش‌های بالاتر، بیشتر آب جذب سطحی شده است که تحت تأثیر رس خاک قرار دارد. به نظر می‌رسد در تحقیق حاضر با توجه به پایین بودن مقدار رس خاک، رس در آب جذب سطحی شده نقش کمی داشته و این باعث شده است که از دقت توابع در مکش‌های بالاتر کاسته شود.

تابع شماره 9 (جدول 5) نشان می‌دهد که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف ( $S_p$ ) با  $\text{CaCO}_3$  و  $D_{b-rel}$  رابطه منفی دارد و 79 درصد تغییرات  $S_p$  در خاک جنگلی مورد مطالعه به این دو متغیر بستگی دارد. دلیل کاهش  $S_p$  با افزایش  $\text{CaCO}_3$  را شاید بتوان به افزایش PR (تابع شماره 1 در جدول 5) نسبت داد. بین  $S_p$  و PR همبستگی منفی و معنی‌دار ( $r = -0/369^{**}$ ) یافت شد. همچنین طبق تابع شماره 3 در جدول 5 با افزایش  $\text{CaCO}_3$  به علت کاهش  $\theta_s$  متعاقباً طبق معادله 3 انتظار می‌رود  $S_p$  نیز کاهش یابد. همچنین بر اساس جدول 4 همبستگی قوی و معنی‌دار بین  $S_p$  و  $D_{b-rel}$  ( $r = -0/815^{***}$ ) به دست آمد. لذا می‌توان گفت که بین جرم مخصوص ظاهری و شاخص کیفیت فیزیکی  $S_p$  رابطه عکس وجود دارد، یعنی با افزایش  $D_{b-rel}$  به علت بالا رفتن فشردگی خاک،  $S_p$  کاهش و از کیفیت فیزیکی خاک کاسته می‌شود. رابطه منفی بین  $S_p$  و جرم مخصوص ظاهری خاک توسط دکستر (2004) نیز گزارش شده است. نتایج تحقیق امامی و همکاران (1389) نیز همبستگی منفی  $S_p$  با جرم مخصوص ظاهری و مقاومت فروروی خاک تایید می‌کند.

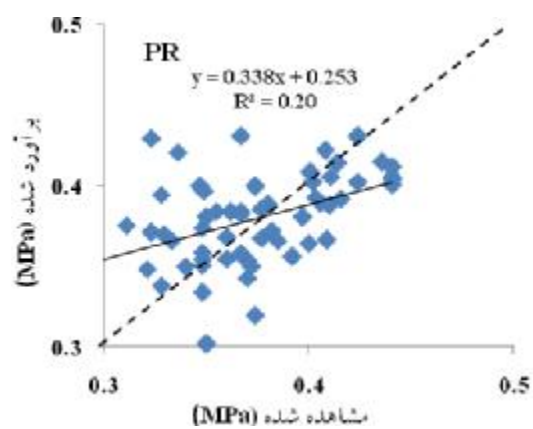
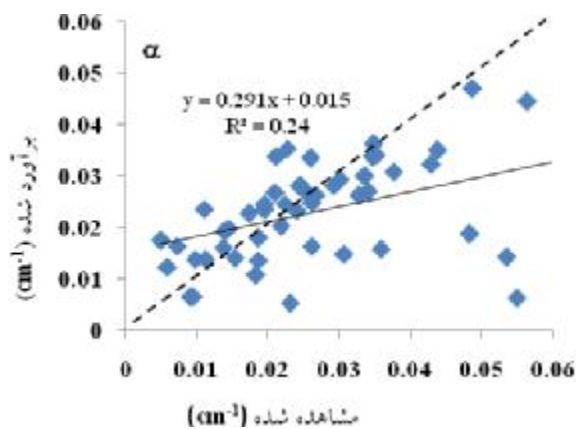
آماره‌های ارزیابی مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی در مرحله آموزش و آزمون در جدول 6 نشان داده شده است. در برآورد هر تابع، گزینش بهترین ترکیب مدل با متغیرهای ورودی بر اساس بزرگ بودن  $d$  و کوچک بودن RMSE و BVTO صورت گرفت. در تمامی توابع، مقادیر مثبت ME (معادله 5) بیان‌گر بیش برآوردگر بودن و مقادیر منفی آن بیان‌گر کم برآوردگر بودن آن تابع می‌باشد.

با توجه به جدول 6 مشاهده می‌شود بر اساس داده‌های آموزشی در بین نقاط منحنی نگهداری آب خاک ( $\theta_s$ ،  $q_{FC}$ ،  $q_{PWP}$  و PAW)، تابع  $\theta_s$  (تابع شماره 3) به علت داشتن بیشترین مقدار  $d$  (0/85) و کمترین مقادیر RMSE و BVTO (به ترتیب  $0/0233$  و  $0/0005 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )

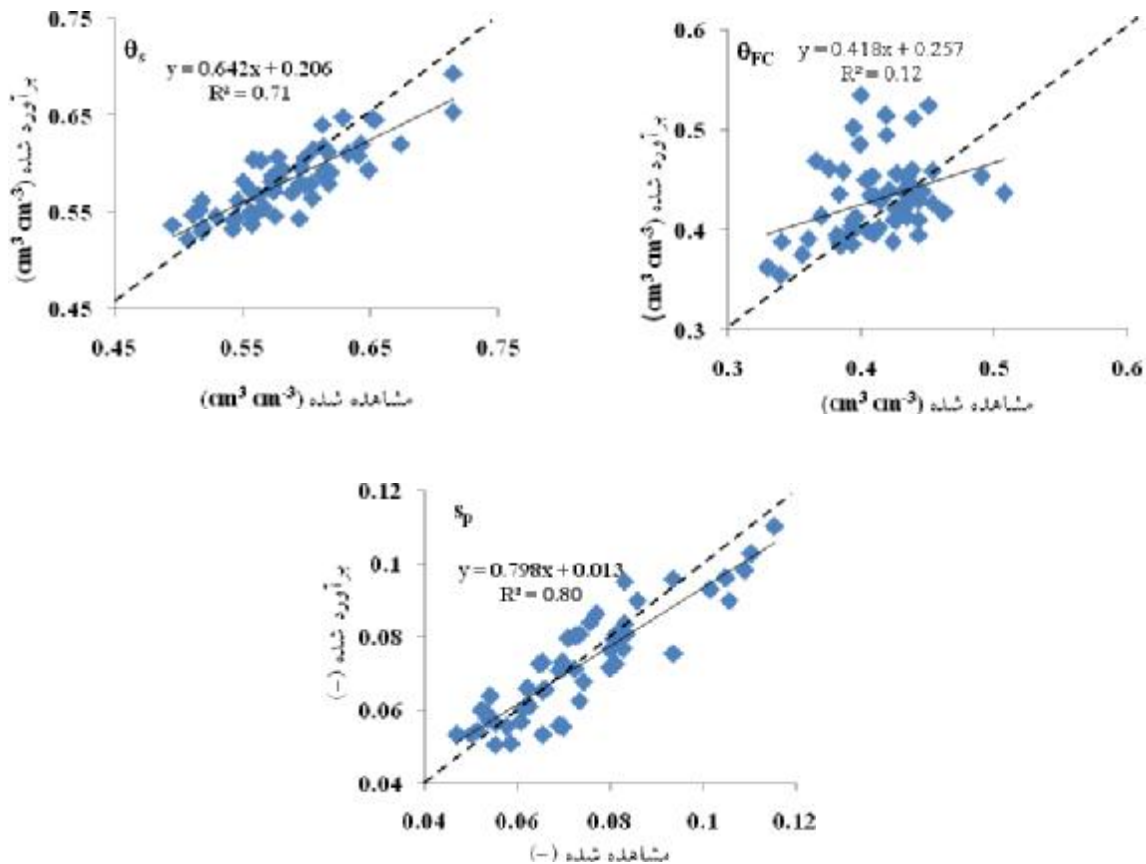
جدول 6- آماره‌های ارزیابی مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی به دست آمده در تحقیق.

شماره تابع	متغیرهای زودیافت	داده‌های آموزشی				داده‌های آزمونی			
		ME <sup>#</sup>	d(-)	RMSE <sup>#</sup>	BVTO <sup>#</sup>	ME	d(-)	RMSE	BVTO
1	CaCO <sub>3</sub> -P <sub>m</sub> -dg <sup>•</sup> -D <sub>b-rel</sub>	0/012	0/491	0/052	0/003	-0/039	0/518	0/045	0/002
2	OC <sup>•</sup> -D <sub>b-rel</sub> - $(\frac{C}{Si})$	-0/093	0/223	0/215	0/046	-0/271	0/196	0/339	0/115
3	CaCO <sub>3</sub> -OC <sup>•</sup> -D <sub>b-rel</sub>	-0/004	0/850	0/023	0/001	-0/059	0/387	0/071	0/005
4	S-D <sub>b-rel</sub> -WR <sup>•</sup>	0/018	0/563	0/047	0/002	-0/011	0/541	0/035	0/001
5	OC <sup>•</sup> -D <sub>b-rel</sub>	-0/035	0/398	0/090	0/008	-0/105	0/326	0/142	0/020
6	S-OC <sup>•</sup>	0/016	0/258	0/040	0/002	0/023	0/480	0/036	0/001
7	D <sub>b-rel</sub> -WR <sup>•</sup> -PR	-0/012	0/497	0/032	0/001	-0/053	0/446	0/076	0/006
8	PR	-0/015	0/304	0/068	0/005	0/062	0/460	0/083	0/007
9	CaCO <sub>3</sub> -D <sub>b-rel</sub>	-0/131	0/452	0/362	0/131	-0/210	0/479	0/473	0/223

d: ضریب هم‌خوانی، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، BVTO: شاخص توازن خطا- واریانس. بقیه علائم در زیر جداول 2، 3 و 5 معرفی شده‌اند. #: واحد این آماره‌ها معادل با واحد متغیر وابسته (جدول 2 و 3) در تابع مورد نظر است.







شکل 3- نمودار 1:1 مقادیر مشاهده و برآورد شده براساس داده‌های آموزشی برای پارامتر a مدل وان‌گنوختن، مقاومت فروروی (PR)، رطوبت اشباع ( $q_s$ )، رطوبت ظرفیت زراعی ( $q_{FC}$ ) و شیب منحنی رطوبتی ( $s_p$ ).

ظاهری نسبی، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل نسبت به توابع برآورد کننده  $q_{FC}$ ،  $q_{PWP}$  و PAW به علت داشتن بیشترین مقدار d و کمترین مقادیر RMSE و BVTO (داده‌های آموزشی) دارای درستی تخمین بیشتری بود. البته گفتنی است که توابع انتقالی رگرسیونی، روابطی هستند که بین سری داده‌های مورد بررسی وجود دارند و ممکن است در سری‌های دیگر داده‌ها این روابط دیگر گونه باشند. به این علت استفاده از توابع انتقالی محدود به منطقه خاصی بوده و استفاده از توابع ایجاد شده در خارج از محدوده‌ای که توابع، اشتقاق یافته‌اند مستلزم راستی‌آزمایی توابع انتقالی است.

پراکنش داده‌ها حول محور 1:1 برای مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده بر اساس سری آموزشی به‌عنوان نمونه برای توابع  $\theta_s$ ،  $q_{FC}$ ،  $s_p$ ، PR و a در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به مقادیر مثبت ME (معادله 5) برای توابع  $q_{FC}$  و PR و مقادیر منفی ME برای توابع  $\theta_s$ ،  $s_p$  و a در جدول 6، همان‌طور که در شکل 3 نیز مشاهده می‌شود مقادیر برآورد شده توسط توابع اشتقاق یافته برای پارامترهای  $q_{FC}$  و PR بیشتر از مقدار واقعی و برای پارامترهای  $\theta_s$ ،  $s_p$  و a کمتر از مقدار واقعی است.

#### نتیجه‌گیری کلی

در خاک جنگلی مورد مطالعه، تابع انتقالی رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) با متغیرهای ورودی جرم مخصوص

## منابع مورد استفاده

- اصغری ش، عباسی ف، نیشابوری مر، اوستان ش و علی‌اصغرزاد ن، 1390. اثرات چهار اصلاح کننده آلی خاک بر پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در یک خاک لوم شنی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 18، شماره 2، صفحه‌های 177 تا 194.
- امامی ح، لکزیان ا و مهاجرپور م، 1389. بررسی رابطه بین شیب منحنی رطوبتی و بعضی از ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک. نشریه آب و خاک، جلد 24، شماره 5، صفحه‌های 1027 تا 1035.
- امیرعابدی ح، اصغری ش، مصری گندشمین ت و کیوان بهجو ف، 1392. برآورد رطوبت‌های ظرفیت زراعی، پژمردگی دائم و قابل استفاده در خاک‌های دشت اردبیل با استفاده از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. مجله تحقیقات کاربردی خاک، جلد 1، شماره 1، صفحه‌های 88 تا 109.
- بیات ح، جوانشیر ش، دواتگر ن و نیشابوری مر، 1392. تأثیر پارامترهای توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های ریز بر تخمین نقطه‌ای منحنی نگهداری آب خاک. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 20، شماره 4، صفحه‌های 27 تا 49.
- تاجیک ف، 1383. ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در برخی مناطق ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 8، شماره 1، صفحه‌های 125 تا 134.
- جره م، بیات ح، صفری سنجایی ع و دواتگر ن، 1392. برآورد مقاومت فروروی با بهره‌گیری از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها. نشریه دانش آب و خاک، جلد 23، شماره 2، صفحه‌های 13 تا 27.
- حق‌وردی ا، قهرمان ب، جلینی م، خشنود یزدی ع و عربی ز، 1390. مقایسه روش‌های مختلف هوش مصنوعی در مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک (مطالعه موردی: شمال و شمال شرق ایران). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 18، شماره 2، صفحه‌های 65 تا 84.
- ذوالفقاری ع و حاج عباسی مع، 1387. تأثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آبریزی خاک در مراتع فریدون شهر و جنگل‌های لردگان. مجله آب و خاک، جلد 22، شماره 2، صفحه‌های 251 تا 262.
- رمضانی م، قنبریان علویجه ب، لیاقت ع و صالحی خشک‌رودی، ش، 1390. برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های شور و شور - سدیمی. مجله مدیریت آب و آبیاری، جلد 1، شماره 1، صفحه‌های 99 تا 110.
- رضایی ع و سلطانی ا، 1377. مقدمه‌ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- شیرانی ح و رفیع‌نژاد ن، 1390. برآورد برخی ویژگی‌های دیریافت خاک‌های استان کرمان با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. مجله پژوهش‌های خاک، جلد 25، شماره 4، صفحه‌های 349 تا 359.
- علی‌جان‌پور شلمانی ع، شعبانپور م، اسدی ح و باقری ف، 1390. تخمین پایداری خاکدانه در خاک‌های جنگلی استان گیلان به‌وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی و توابع انتقالی رگرسیونی. نشریه دانش آب و خاک، جلد 21، شماره 3، صفحه‌های 153 تا 162.
- فراهانی ا، مصدقی مر و محبوبی ع، 1391. اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی و بررسی پدیده سخت‌شوندگی در برخی از خاک‌های استان همدان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال 16، شماره 61، صفحه‌های 181 تا 194.
- فرخیان فیروزی ا و همایی م، 1384. ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک‌های گچی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد 6، شماره 24، صفحه‌های 129 تا 142.
- قربانی دشتکی ش و همایی م، 1381. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیر اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد 3، شماره 12، صفحه‌های 1 تا 15.
- قنبریان علویجه ب و لیاقت ع، 1390. ارزیابی توابع انتقالی و تأثیر ماده آلی در پیش‌بینی رطوبت اشباع خاک. نشریه آب و خاک، جلد 25، شماره 5، صفحه‌های 1016 تا 1024.
- Asgarzadeh H, Mosaddeghi MR, Mahboubi AA, Nosrati A and Dexter AR, 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma* 166: 34-42.

- Bauer A and Blak AL, 1992. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. *Soil Science Society of America Journal* 56: 248-254.
- Baker L and Ellison D, 2008. The wisdom of crowds – ensembles and modules in environmental modelling. *Geoderma* 147: 1–7.
- Bayat H, Neyshabouri MR, Hajabbasi MA, Mahboubi AA and Mosaddeghi MR, 2008. Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 32: 425-433.
- Blake GR and Hartge KH, 1986a. Particle density. Pp. 377-381. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2 nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Blake GR and Hartge KH, 1986b. Bulk density. Pp. 363-375. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2 nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Brahim N, Bernoux M and Gallali T, 2012. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. *Journal of Arid Environments* 81: 77-83.
- Bouma J, 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advanced Soil Science* 9:177–213.
- Botula YD, Cornelis WM, Baert G and Van Ranst E, 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management* 111: 1-10.
- Busscher WJ, Bauer PJ, Camp CR and Sojka RE, 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil & Tillage Research* 43: 205-217.
- Cornelis WM, Ronsyn J, van Meirvenne M and Hartmann R, 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal* 65: 638–648.
- Dekker LW and Jungrius PD, 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena* 18:173-183.
- Dexter AR, 2004. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201–214.
- Dexter AR and Bird NRA, 2001. Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research* 57: 203–212.
- Evrendilek F, Celik I and Kilic S, 2004. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grass land, and crop land ecosystem Turkey. *Journal of Arid Environments* 59: 743–752.
- Gardner WH, 1986. Water content. Pp. 493-544. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle-size analysis. Pp. 255–293. In: Dane J H and Topp G C (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Ghorbani Dashtaki S, Homaei, M and Khodaverdilo H, 2011. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Mangement* 26: 68-74.
- Gorucu S, Khalilian A, Han YJ, Dodd RB and Smith BR, 2006. An algorithm to determine the optimum tillage depth from soil penetrometer data in Coastal Plain soils. *Applied Engineering Agriculture* 22: 625-631.
- Hillel D, 2004. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. USA.
- Kaufmann M, Tobias S and Schulin R, 2010. Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173: 573–583.
- Kemper A and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. Pp. 425-437. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2 nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kelishadi H, Mosaddeghi MR, Hajabbasi MA and Ayoubi S, 2014. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma* 213: 426–434.
- Khodaverdilo H, Homaei M, van Genuchten MTh and Ghorbani Dashtaki Sh, 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology* 399: 93-99.
- Kozak E, Pachepsky YA, Sokolowski S, Sokolowska Z and Stepniewski W, 1996. A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science America of Journal* 60: 1291-1297.
- Lemenih M, Karlun E and Olsson M, 2005. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in smallholders farming system in Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 373–386.
- Ley GJ, Mullins CE and Lal R, 1995. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 193-200.
- Merdun H, 2010. Alternative methods in the development of pedotransfer functions for soil hydraulic characteristics. *Eurasian Soil Science* 43(1): 62–71.
- Minansy B, Mcbartney AB, 2002. The neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 66: 352-361.
- 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.

- Nelson DW and Sommers LE, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539–579. In: Page AL, Miller RH, Keeny DR (eds). *Methods of Soil Analysis, Part 2. Agronomy Monograph. 9.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Nemes A, Schaap M G and Wösten J H M, 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1093–1102.
- Ryan BF and Joiner BL, 1994. *Minitab Handbook*. Pp. 483-485.
- Salchow E, Lal R, Fausey NR and Ward A, 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in Southern Ohio. *Geoderma* 73: 165–181.
- Schaap MG, Leij FJ and van Genuchten MTh, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 250: 3–4.
- Shirazi MA and Boersma L, 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal* 48: 142–147.
- van Genuchten MTh, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- van Genuchten MTh, Leij FJ and Yates SR, 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065 R.S.Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Ada,OK, p. 93.
- Vereecken H, Diels J, van Orshoven J, Feyen J and Bouma J. 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1371–1378.
- Warrick AW, 2002. *Soil Physics Companion*. CRC press. New York.
- Willmott CJ, 1981. On the validation of models. *Physical Geography*. 2: 184–194.
- Xiangsheng Yi, Guosheng Li and Yanyu Yin, 2013. Comparison of three methods to develop pedotransfer functions for the saturated water content and field water capacity in permafrost region. *Cold Regions Science and Technology* 88: 10–16.