

## برآورد مقاومت فروروی با بهره‌گیری از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها

محمد جُرّه<sup>1</sup>، حسین بیات<sup>2\*</sup>، علی اکبر صفری سنجانی<sup>3</sup> و ناصر دواتگر<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 90/11/03 تاریخ پذیرش: 91/08/06

<sup>1</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

<sup>2</sup> استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

<sup>3</sup> استاد گروه خاکشناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

<sup>4</sup> استادیار گروه خاکشناسی مؤسسه تحقیقات برنج کشور

\* مسئول مکاتبه: Email: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

### چکیده

مقاومت فروروی (PR) خاک دارای تغییرپذیری بالایی است و در بسیاری از پایگاه‌های اطلاعاتی آگاهی چندانی درباره آن وجود ندارد. از سوی دیگر اندازه‌گیری این پارامتر پرهزینه نیز می‌باشد. بنابراین هدف این پژوهش برآورد PR از دیگر پارامترهای زود یافت خاک با بهره‌گیری از توابع انتقالی (PTFs) بود. تعداد 53 نمونه خاک از خاک‌های شاخص بر پایه سری خاک‌های غالب از استان همدان نمونه‌برداری شد. توزیع اندازه ذرات (کوچکتر از 2 میلی‌متر)، توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت (0/25 تا 8 میلی‌متر) و ریز (کوچکتر از 2 میلی‌متر)، رطوبت خاک در حین اندازه‌گیری PR و جرم مخصوص ظاهری در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. PR و پارامترهای کیفی ساختمان خاک (شکل، نوع و اندازه خاکدانه) در محل نمونه برداری در دو لایه رویین (10 تا 35 سانتی‌متری) و زیرین (20 تا 45 سانتی‌متری) خاک اندازه‌گیری شد. ابتدا جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک که پارامترهای مرسوم برآورد کننده PR می‌باشند وارد مدل رگرسیونی شدند. سپس پارامترهای کیفی ساختمان خاک (شکل، نوع و اندازه خاکدانه) و همچنین پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های درشت و ریز نیز به پارامترهای پیشین افزوده شدند. در پایان میزان بهبود و برتری هر یک از مدل‌ها بر پایه آماره‌های ضریب تبیین، ضریب تبیین تعدیل شده، مجذور میانگین مربعات خطا، معیار اطلاعات آکایک و بهبود نسبی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودن پارامترهای فراکتالی، به ورودی‌های مرسوم برآورد کننده PR باعث بهبود معنی‌دار معیارهای ارزیابی صحت مدل‌ها شد. همچنین بکارگیری پارامترهای کیفی ساختمان خاک به همراه پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات باعث بهبود معنی‌دار پیش‌بینی PR شد.

واژه‌های کلیدی: بعد فراکتالی، توابع انتقالی، مقاومت فروروی

## Estimation of Soil Penetration Resistance Using Fractal Parameters of Particle and Aggregate Size Distributions

M Jorreh,<sup>1</sup> H Bayat,<sup>2\*</sup> A A Safari Sinejani<sup>3</sup> and N Davatgar<sup>4</sup>

Received: 23 January 2012 Accepted: 26 November 2012

<sup>1</sup>Former M.Sc. student of Soil Sci., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran.

<sup>2</sup>Assist. Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran.

<sup>3</sup>Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran.

<sup>4</sup>Assist. Prof., Dept. of Soil Sci., Rice Research Institute of Iran, Rasht.

\*Corresponding Author Email: [h.bayat@basu.ac.ir](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

### Abstract

Penetration resistance (PR) is a highly variable soil property and there is no accurate and representative PR data in most databases. On the other hand, direct measurement of the PR is costly and expensive. The objective of this study was prediction of PR from easily available soil properties using pedotransfer functions (PTFs). Fifty three soil samples were taken from dominant soil series of Hamadan province. Particle, macro and micro aggregate size distributions, water content and bulk density were measured in the laboratory. PR and soil structural qualitative parameters were measured in the field. In the first regression model, bulk density and water content as conventional predictors of PR were introduced to the model. Then, soil structural qualitative parameters (aggregates shape, type and size), primary particle, micro and macro aggregate size distribution fractal parameters were introduced to the models to predict PR. Finally the improvement of PR prediction using various developed PTFs were evaluated by the statistical indices as  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$ , root mean square error, Akaike information criterion and relative improvement. The results showed that using fractal parameters as predictors along with the conventional predictors significantly improved the accuracy and reliability of the models. Using soil structural qualitative parameters along with fractal parameters of particle size distribution may significantly improve the PR predictions.

**Key words:** Fractal dimension, Pedotransfer functions, Penetration resistance

مقدمه  
فروری (PR<sup>1</sup>) پارامتر<sup>2</sup> سودمندی در شناسایی  
فشرده‌گی لایه‌های خاک و میزان نرم شدگی بین  
نمونه‌های خاک است. همچنین در شناسایی تغییرات  
مقاومت به فروری در خاک با گذشت زمان و ارزیابی  
تأثیر مقاومت خاک بر رشد ریشه کاربرد دارد

در خاک‌های سخت رشد ریشه و سبز شدن  
نهال با دشواری‌های بسیاری روبرو می‌باشد. این  
خاک‌ها هزینه‌ها و انرژی کشت و کار را افزایش می‌دهند  
و در رژیم‌های رطوبتی مناسب برای کشاورزی، این  
خاک‌ها اعمال محدودیت می‌کنند (کمپل 1975). مقاومت

<sup>1</sup> Penetration resistance

<sup>2</sup> Parameter

کاسل 1980). حتی اگر جرم مخصوص ظاهری خاک و رطوبت آن ثابت بماند باز مقاومت فروروی خاک با گذشت زمان تغییر می‌کند (پرفکت و همکاران 1992)، که شاید بتوان آن را به تغییرات تدریجی عوامل پیوندی خاکدانه‌ها در طی زمان مرتبط دانست. مقاومت فروروی با افزایش رطوبت خاک کاهش می‌یابد و با افزایش BD افزایش می‌یابد (کولن و کوپرس 1983). در برخی از خاک‌ها، تغییر در PR با BD و محتوای آب، خطی نیست (مارشال و همکاران 1996). مدل‌های گوناگون بسیاری (مانند مدل‌های خطی، توانی، چند جمله‌ای و نمایی) برای آزمون رابطه بین PR با رطوبت و BD مورد استفاده قرار گرفته است (وز و همکاران 2001). آپادهایایا و همکاران (1982) با بررسی یک خاک لوم سیلتی، یک معادله نمایی را برای برآورد PR به عنوان تابعی از GWC و BD ارائه کردند. همچنین آنها بررسی‌های بیشتری را برای ارزیابی درستی این مدل‌ها پیشنهاد کردند. داسیلوا و کی (1997) دریافتند که PR به مقدار رس و BD بستگی دارد. این پژوهشگران معادله‌ای را بدست آوردند که با ثابت بودن مقدار رس و با افزایش میزان آب خاک، اندازه پارامترهای BD و PR، کاهش می‌یابد. گرانوالد و همکاران (2001b) گزارش کردند که BD بیشترین تأثیر را در پیش بینی PR دارد و پس از آن پارامتر GWC از اهمیت بیشتری برخوردار است. ساخت توابع انتقالی جدید دشوار است بنابراین منطقی است که از پارامترهایی که در توابع پیشین ایجاد شده است، بهره‌گیری شود (مک‌برانتی و همکاران 2002). بیات و همکاران (2008) با بررسی 381 نمونه خاک گردآوری شده از دو شهر همدان و مراغه، توانستند با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی و به کمک پارامترهای BD، GWC، TP و  $\theta_v/TP$  (درجه اشباع)، PR را برآورد کنند. آنها دریافتند که افزودن پارامترهای TP و  $\theta_v/TP$  به مدل‌هایی که تنها دو پارامتر BD و GWC را دارا بودند، صحت مدل‌ها را بهبود بخشید. در این پژوهش تلاش شد تا افزون بر

(اسالیوان و بال 1982). مقاومت به فروروی بستگی به نوع خاک، توزیع اندازه و شکل ذرات خاک، کانی شناسی رس، اندازه اکسیدهای بی شکل (آمورف)، درصد ماده آلی و شیمی محلول خاک دارد (جرارد 1965). به دلیل تغییرپذیری مکانی بالای PR، به دست آوردن مقادیر دقیق آن در کشتزارها دشوار است (وز و همکاران 2001). از اینرو پژوهشگران از توابع انتقالی (PTFs)<sup>1</sup> برای برآورد آن بهره می‌برند. توابع انتقالی برای توصیف معادله‌هایی بکار می‌رود که وابستگی ویژگی‌های دیریافت خاک (مانند گنجایش تبادل کاتیونی و هدایت هیدرولیکی خاک) با متغیرهای زودیافت خاک (مانند بافت، ساختمان، جرم مخصوص ظاهری و میزان مواد آلی) را نشان دهد (وستن و همکاران 2001). گزینش متغیرهای شایسته و بایسته به عنوان ورودی توابع انتقالی، در توانایی پیش‌بینی مدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (مسکینی 1389). نمس و همکاران (2003) دریافتند که اهمیت داده‌هایی که به عنوان ورودی توابع انتقالی بکار می‌رود بیشتر از چگونگی تهیه این توابع است. تاکنون از پارامترهای گوناگونی برای برآورد مقاومت فروروی در توابع انتقالی بهره‌گیری شده است که عبارتند از جرم مخصوص ظاهری<sup>2</sup> (BD) (پیدجن و ساون 1977 و هندرسون و همکاران 1988)، میزان رطوبت جرمی یا (GWC<sup>3</sup>) (فایر و داماتا 1994 و گرانوالد و همکاران 2001)، بافت خاک (کوروپ و همکاران 1994 و پاپالا و همکاران 1995)، مکش ماتریک خاک (باسچر 1990)، عمق خاک (گرانوالد و همکاران 2001b)، ماده آلی (تو و کی 2005)، تخلخل کل (TP<sup>4</sup>) و اشباع نسبی ( $\theta_v/TP$ ) (بیات و همکاران 2008).

جرم مخصوص ظاهری، رطوبت و ساختمان خاک بر مقاومت فروروی تأثیر زیادی دارند (بیرد و

<sup>1</sup> Pedotransfer functions

<sup>2</sup> Bulk density

<sup>3</sup> Gravimetric water content

<sup>4</sup> Total porosity

سانتی‌متری) خاک تهیه و پس از رساندن به آزمایشگاه، هوا خشک گردیده و برای برخی آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی آماده گردیدند. مقاومت فروری به کمک دستگاه فروسنج دیجیتال مدل Rimic CP20 در محل نمونه برداری از خاک به گونه درجا اندازه‌گیری شد. نمونه جداگانه‌ای از خاکها برای اندازه‌گیری رطوبت خاک بلافاصله پس از اندازه‌گیری PR برداشته شد. شکل، نوع و اندازه خاکدانه‌ها نیز در جایگاه نمونه‌برداری از خاک بر اساس راهنمای نمونه‌برداری و تشریح خاکها (شونبرگر و همکاران 1998) یادداشت گردید. در آزمایشگاه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها<sup>1</sup> (MWD) با روش الک تر (بیات و همکاران 1386)، توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز (کوچکتر از 2 میلی‌متر) با روش هیدرومتر و الک تر (میلان و همکاران 2007) اندازه‌گیری شد. در واقع اندازه‌گیری خاکدانه‌های ریز مشابه توزیع اندازه ذرات (گی و ار 2002) است. با این تفاوت که از عوامل دیسپرس کننده استفاده نشده و به جای الک خشک برای تفکیک خاکدانه‌هایی در اندازه شن از الک تر استفاده می‌شود. توزیع اندازه ذرات (0 تا 2 میلی‌متر) به روش هیدرومتر و الک خشک (گی و ار 2002) و BD به روش کلوخه (کمپل و هنشال 2001) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش از پارامترهای فراکتالی مدل‌های تیلر و ویت گرفت (1992)، بیرد و همکاران (2000) و مدل پریر و بیرد (2002 و 2003)، برای توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت (0/25 تا 8 میلی‌متر) و ریز (کوچکتر از 2 میلی‌متر) بهره‌گیری شد.

با توجه به اینکه تقسیم‌بندی استاندارد برای توزیع اندازه خاکدانه‌ها وجود ندارد، در این تحقیق بر اساس مطالعه میلان و همکاران (2007) خاکدانه‌های با قطر کمتر از 2 میلی‌متر به‌عنوان خاکدانه‌های ریز نامگذاری گردید. چون در این گروه، خاکدانه‌هایی در اندازه 2 میکرومتر نیز اندازه‌گیری می‌شوند. در اندازه‌گیری خاکدانه‌های درشت‌تر از روش کمپر و

پارامترهای BD، رطوبت خاک و بافت خاک (که به گونه مرسوم برای برآورد مقاومت فروری به کار می‌رود)، از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها (خاکدانه‌های درشت (0/25 تا 8 میلی‌متر) و ریز (2 میلی‌متر)) و همچنین از پارامترهای کیفی خاک مانند شکل، نوع و اندازه خاکدانه به عنوان ورودی‌های برآورد کننده مقاومت فروری بهره‌گیری شود.

به تازگی نظریه فراکتالی همانند ابزاری نیرومند برای مدل کردن پدیده‌های پیچیده بکار رفته است (تیلر و ویت گرفت 1992). این نگرش به پیشنهاد معادله‌هایی برای منحنی‌های مشخصه آب خاک، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و اشباع خاک و توزیع اندازه منافذ درشت در خاک انجامیده است (شفیعی 1375). به تازگی بیات و همکاران (2011) به گونه کارآمدی از پارامترهای فراکتالی برای برآورد منحنی رطوبتی بهره‌گیری نمودند. مقیاس فراکتالی توزیع اندازه ذرات، بسیاری از فرایندهای دینامیک و استاتیک در خاک، مانند انتقال آب و نمکها، گنجایش نگهداری آب، اندوخته گرمایی و هدایت گرمایی را کنترل می‌کند (ارساهین و همکاران 2006). احتمال می‌رود بهره‌گیری از پارامترهای فراکتالی باعث بهبود برآورد PR گردد. تا جایی که جستجو شد این پدیده تاکنون در هیچ پژوهشی بررسی و گزارش نشده است. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: 1. بررسی میزان بهبود برآورد PR با بهره‌گیری از پارامترهای کیفی خاک مانند شکل، نوع و اندازه خاکدانه 2. بررسی بهبود برآورد PR با بهره‌گیری از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و توزیع اندازه خاکدانه‌ها (خاکدانه‌های ریز و درشت).

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش 53 نمونه خاک از خاک‌های شاخص بر پایه سری خاک‌های غالب از استان همدان نمونه برداری شد. نمونه‌های دست خورده از دو لایه روبین (10 تا 35 سانتی‌متری) و زیرین (20 تا 45

<sup>1</sup> Mean weight diameter

هیچ‌گونه مقاومتی نداشته باشد در کلاس "سست"<sup>4</sup> قرار می‌گیرد. اگر خاک به آسانی و در برابر فشار جزئی به پودر و تكدانه تبدیل شود در کلاس "نرم"<sup>5</sup> قرار می‌گیرد. اگر خاک در بین انگشتان شست و سبابه به آسانی خرد شود در کلاس "کمی سخت"<sup>6</sup> قرار می‌گیرد. اگر خاک با دست‌ها به آسانی ولی در بین انگشتان شست و سبابه به سختی شکسته شود در کلاس "سخت"<sup>7</sup> قرار می‌گیرد. اگر خاک با فشار دست‌ها به سختی شکسته شود در کلاس "خیلی سخت"<sup>8</sup> قرار می‌گیرد. اگر خاک با فشار دست‌ها شکسته نشود در کلاس "فوق‌العاده سخت"<sup>9</sup> قرار می‌گیرد. پس از تعیین کلاس پایداری هر خاک آن‌ها از طریق تبدیل به کدهایی کمی شدند. سپس دو پارامتر محاسبه شده به همراه پایداری خاک به عنوان ورودی برای برآورد مقاومت فروروی بکار رفتند.

محاسبه پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها (خاکدانه‌های ریز و خاکدانه‌های درشت) و توزیع اندازه ذرات

با داشتن توزیع اندازه خاکدانه‌ها و توزیع اندازه ذرات از مدل‌های ذیل برای محاسبه ابعاد فراکتالی استفاده گردید. خاکدانه‌های درشت در پنج کلاس با اندازه 0/25 تا 0/5، 0/5 تا 1، 1 تا 2، 2 تا 4/75 و 4/75 تا 8 میلی‌متر تفکیک گردیدند.

مدل تیلر و ویت گرفت (1992)

$$\frac{M(x < X)}{Mt} = \left(\frac{x}{XL}\right)^{3-D_m} \quad [1]$$

$D_m$ : بعد فراکتال جرمی،  $M(x < X)$ : جرم تجمعی خاکدانه‌ها بر روی غربال‌ها با اندازه‌های کوچکتر از  $X$ ،  $Mt$ : جرم کل خاکدانه‌ها (باقی مانده بر روی تمام

روزنو (1986) که توسط بیات و همکاران (1386) اصلاح شده بود و توزیع اندازه خاکدانه‌هایی به قطر 0/25 تا 8 میلی‌متر را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده گردید. این گروه خاکدانه‌ها به صورت اختیاری تحت عنوان خاکدانه‌های درشت نامگذاری گردید.

برای توزیع اندازه ذرات نیز از مدل‌های فراکتالی بیرد و همکاران (2000) و مدل پریر و بیرد (2002 و 2003) بهره‌گیری شد.

شکل، نوع، اندازه و درجه وضوح خاکدانه‌ها که پارامترهایی کیفی هستند نیز کمی شده و برای محاسبه دو پارامتر طول مؤثر مسیر انتشار<sup>1</sup> و طول مؤثر مسیر انتشار ASCALE<sup>2</sup> بهره‌گیری شدند (جارویس و همکاران 1997). به طور مختصر چگونگی محاسبه پارامترهای مذکور بدین ترتیب بود که سه پارامتر اندازه، شکل و درجه وضوح خاکدانه‌ها به کدهایی تبدیل شدند. به عنوان مثال برای خاکدانه‌های ریز عدد 1، متوسط عدد 2، درشت عدد 3 و خیلی درشت عدد 4 اختصاص داده شد. برای شکل و درجه وضوح خاکدانه‌ها نیز به همین ترتیب کدهایی داده شد. سپس از این کدها استفاده کرده و دو پارامتر مذکور توسط نرم‌افزار ارائه شده به وسیله جارویس و همکاران (1997) محاسبه گردید. پایداری خاک<sup>3</sup> بر اساس راهنمای نمونه‌برداری و تشریح خاک‌ها (شونبرگر و همکاران 1998) تعیین گردید. پایداری خاک یک ویژگی کیفی است و برای بررسی مقاومت خاک در مقابل تغییر شکل و گسستگی تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه این ویژگی با میزان رطوبت خاک تغییر می‌کند می‌توان آن را در حالت‌های خشک، مرطوب و خیس تعیین نمود که در این تحقیق در حالت خشک تعیین گردید. در حالت خشک خاک‌ها از نظر مقاومت در 6 کلاس قرار می‌گیرند (شونبرگر و همکاران 1998): اگر خاک در برابر فشار

<sup>4</sup> Loose

<sup>5</sup> Soft

<sup>6</sup> Slightly hard

<sup>7</sup> Hard

<sup>8</sup> Very hard

<sup>9</sup> Extremely hard

<sup>1</sup> Effective diffusion pathlength (mm)

<sup>2</sup> Effective diffusion pathlength ASCALE (mm)

<sup>3</sup> Soil consistency

$M(x \leq x_i)$ : جرم تجمعی خاک یا درصد جرمی خاک تشکیل شده از واحدهایی (مانند ذرات اولیه، ذرات خرد شده و خاکدانه‌های ریز) با قطر کوچکتر یا مساوی  $x_i$ ،  $\alpha$ : ثابت،  $L$ : حد بالایی اندازه ذرات در هر کلاس،  $D$ : بعد فراکتال جرمی توزیع اندازه ذرات. یک نکته مهم اینکه، روابط اندازه و جرم فراکتالی بر پایه فرض یکسان بودن  $BD$  می‌باشند (میلان و همکاران 2007). توصیف کلیه علائم استفاده شده در این تحقیق در جدول 1 ذکر گردید.

در این پژوهش برای ساخت توابع انتقالی از روش رگرسیون غیر خطی بهره‌گیری شد. در آغاز همه متغیرها از دیدگاه نرمال بودن داده‌ها بررسی شدند و آنهایی که توزیع نرمال نداشتند نرمال و سپس استاندارد شدند. برای بررسی اثر پارامترهای فراکتالی ذرات، خاکدانه‌های ریز و درشت و پارامترهای ساختمانی چندین مدل ساخته شد که ورودی‌های مدل‌ها در جدول 2 آورده شده است.

#### آماره‌های ارزیابی توابع انتقالی

در پایان برتری و صحت هر یک از مدل‌ها بر پایه آماره‌های  $R^2$  (ضریب تبیین) و  $R^2_{adj}$  (ضریب تبیین تعدیل شده)، مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE^3$ )، معیار اطلاعات آکایک و ضریب بهبود نسبی ( $RI^4$ ) ارزیابی شد.

ضریب بهبود نسبی به صورت زیر محاسبه شد

$$RI = \frac{RMSE 1 - RMSE 2}{RMSE 1} \times 100 \quad [4]$$

$RI$ : ضریب بهبود نسبی،  $RMSE1$ : مجذور میانگین مربعات خطای مدل پایه،  $RMSE2$ : مجذور میانگین مربعات خطای مدل مورد نظر

غریبالها)،  $XL$ : بالاترین اندازه روزنه غریبال که برابر با 8 mm برای خاکدانه‌های درشت و 2 mm برای خاکدانه‌های ریز است،  $x$ : میانگین قطر خاکدانه‌ها در هر کلاس.

$D_m$  در فرمول فوق با استفاده از رگرسیون لگاریتمی داده‌های اندازه‌گیری شده از روش الک خشک بدست می‌آید (گولسر 2006). ولی در این پژوهش توزیع اندازه خاکدانه‌ها که از روش الک تر بدست آمد در مدل فوق مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل  $BD$  و شکل خاکدانه‌ها مستقل از مقیاس فرض می‌شود و قابل کاربرد بر ذرات خاک نیز می‌باشد.

مدل بیرد و همکاران (2000)

در این مدل، توزیع تجمعی جرم ذرات جامد مدل  $PSF^1$  بر روی توزیع اندازه ذرات خاک  $(PSD)^2$  بکار بکار رفت:

$$Ms(d \leq d_i) = cd_i^{3-D} \quad [2]$$

$Ms(d \leq d_i)$ : جرم یا حجم تجمعی عناصر از کوچک به بزرگ که می‌تواند ذرات جامد و یا منافذ باشد. در مورد منافذ حجم تجمعی بکار می‌رود،  $d_i$ : حد بالایی اندازه عناصر در هر کلاس اندازه (منافذ یا ذرات)،  $D$ : بعد فراکتالی جرمی توزیع اندازه ذرات یا منافذ،  $c$ : ثابت مدل.

مدل  $PSF$  با فرض تناسب میان توزیع منافذ و ذرات جامد است و از آن برای محاسبه بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات و هم توزیع اندازه منافذ استفاده شده است. پریر و همکاران (1999) گزارش کردند که هم فاز جامد و هم منافذ را می‌توان با قانون توانی توزیع مدل‌سازی کرد.

مدل پریر و بیرد (2002 و 2003)

$$M(x \leq x_i) = (\alpha^{D-3})(L^{D-3}) x_i^{3-D} \quad [3]$$

<sup>3</sup> Root mean square error

<sup>4</sup> Relative improvement

<sup>1</sup> Pore-solid fractal

<sup>2</sup> Particle size distribution

معیار اطلاعات آکایک<sup>1</sup>، AIC، (آکایک 1974)

$$AIC = N \ln \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(PR_m - PR_p)^2}{N} \right] + 2n_p \quad [5]$$

معیار اطلاعات آکایک تعداد پارامترهای مدل که باید برآورد شوند،  $n_p$ ، را نیز وارد محاسبات می‌نماید.  $N$  تعداد نمونه‌های خاک،  $PR_m$  مقاومت فروروی اندازه‌گیری شده و  $PR_p$  مقاومت فروروی برآورد شده می‌باشد. هرچه AIC کوچک‌تر باشد کیفیت برازش بالاتر است. اگر انطباق کامل مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی رخ دهد AIC به سمت منفی بی نهایت میل خواهد کرد.

روش مقایسه با بهره‌گیری از آماره AIC به این گونه می‌باشد که نخست یکی از مدل‌ها همانند مدل پایه گزینش می‌شود و مدل‌های دیگر نسبت به آن سنجیده می‌شود. اندازه AIC برای مدل پایه و مدل‌های دیگر تعیین می‌شود. اگر اندازه به دست آمده از سنجش مدل پایه با مدل مقایسه شونده از 0/95 اندازه AIC به دست آمده برای مدل پایه کمتر باشد، به این معنی است که مدل مقایسه شونده با اطمینان 95 درصد بهتر از مدل پایه است و در غیر این صورت مدل پایه ترجیح داده می‌شود (هوانگ و همکاران 2002).

## نتایج و بحث

کلیه علائم اختصاری استفاده شده در این تحقیق به همراه توصیف آن‌ها در جدول 1 آورده شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق 18 تابع انتقالی ایجاد گردید، متغیرهای ورودی هر تابع انتقالی در جدول 2 نشان داده شده است. متغیر وابسته برای کلیه توابع ایجاد شده PR بود. ویژگی‌های آماری کلیه متغیرها در جدول شماره 3 نشان داده شده است. این جدول شامل تمام متغیرهایی است که مستقیماً اندازه‌گیری شده و یا از طریق مدل‌های فراکتالی

محاسبه گردیده‌اند. کلیه متغیرهای مربوط به بافت و ساختمان خاک و نیز پارامترهای فراکتالی محاسبه شده دارای دامنه تغییرات بالایی هستند.

همبستگی خطی میان PR و متغیرهای ورودی، در جدول 4 آورده شده است. بین PR و W، همبستگی منفی در سطح احتمال 1% وجود داشت. بین PR و BD همبستگی هر چند مثبت بود اما معنی دار و چشم گیر نبود. بیات و همکاران (2008) نیز گزارش کردند که PR همبستگی مثبت و خیلی چشم گیر با BD در خاک‌های همدان داشت اما برای خاک‌های مراغه این همبستگی چشم گیر نبود. دلیل همبستگی مثبت PR با BD و همبستگی منفی PR با W این است که PR با افزایش محتوای آب خاک کاهش می‌یابد و با افزایش BD افزایش می‌یابد (کولن و کوپرس 1983).

مقاومت فروروی همبستگی منفی و چشم گیری در سطح احتمال 5% با شن و همبستگی مثبت و چشم گیری در سطح احتمال 5% با میزان سیلت داشت (جدول 4). در یک مقدار ثابت از اندازه آب و BD، PR با کاهش اندازه ذرات تمایل به افزایش دارد (مارشال و همکاران 1996). دلیل این افزایش بالاتر بودن تنش مؤثر<sup>2</sup> در نتیجه پایین بودن پتانسیل ماتریک در خاکی با بافت ریزتر می‌باشد (مولینز و همکاران 1987).

نکته بارز اینکه PR همبستگی مثبت و چشم گیری نیز با ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات مدل‌های بیرد و پریر در سطح احتمال 1% داشت (جدول 4). یکی از دلایل همبستگی این پارامتر با ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با ریزتر شدن ذرات خاک بعد فراکتالی افزایش می‌یابد (تیلور و ویت گرفت 1992). در مقابل PR همبستگی چشم گیری با ابعاد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز و خاکدانه‌های درشت نداشت (جدول 4). شاید غیر خطی بودن همبستگی آنها یکی از دلایل یافته بالا باشد.

<sup>2</sup> Effective stress

<sup>1</sup> Akaike information criterion

جدول 1- توصیف علائم استفاده شده

متغیر	توصیف	متغیر	توصیف
Z <sub>1</sub>	طول مؤثر مسیر انتشار	C Psd B	پارامتر فراکتالی توزیع اندازه ذرات مدل بیرد
Z <sub>2</sub>	طول مؤثر مسیر انتشار ASCALE	D Psd B	بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات مدل بیرد
Z <sub>3</sub>	پایداری خاک	D micro M	بعد فراکتالی خاکدانه‌های ریز مدل تیلر و ویت کرافت
W	رطوبت جرمی در حین اندازه‌گیری مقاومت فروری	$\alpha$ micro MI	پارامتر فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های ریزمدل پریر و بیرد
PR	مقاومت فروری	D micro MI	بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز مدل پریر و بیرد
% Clay	درصد رس	C micro B	پارامتر فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های ریزمدل بیرد
% Silt	درصد سیلت	D micro B	بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز مدل بیرد
% Sand	درصد شن	D MWD M	بعد فراکتالی خاکدانه‌های درشت مدل تیلر و ویت کرافت
MWD	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	C MWD B	پارامتر فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت مدل بیرد
BD	جرم مخصوص ظاهری	D MWD B	بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت مدل بیرد
$\alpha$ Psd MI	پارامتر فراکتالی اندازه ذرات مدل پریر و بیرد	$\alpha$ MWD MI	پارامتر فراکتالی خاکدانه‌های درشت مدل پریر و بیرد
D Psd MI	بعد فراکتالی اندازه ذرات مدل پریر و بیرد	D MWD MI	بعد فراکتالی خاکدانه‌های درشت مدل پریر و بیرد

معنی‌داری نشان داد (به ترتیب از 0/30 به 0/38 و از 0/18 به 0/28)، ضمن اینکه اندازه RMSE کاهش یافت (از 0/82 به 0/77).

هر چند که تا کنون در مورد استفاده از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات برای تخمین PR گزارشی منتشر نشده است، ولی هورن (1984) گزارش کرد که PR تحت تاثیر توزیع اندازه ذرات خاک قرار دارد. بنابراین با توجه به کمی شدن توزیع اندازه ذرات خاک توسط پارامترهای فراکتالی، نتیجه حاصله مورد انتظار بود.

در جدول 5 نتایج مدل‌های رگرسیونی آورده شده است. به طور کلی این یافته‌ها نشان داد که افزودن پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت و ریز می‌تواند باعث بهبود مدل‌های مرسوم برآورد کننده PR شود. در مدل‌هایی که از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات بهره‌گیری شد، اندازه R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> افزایش یافته است، که این نتیجه می‌تواند به دلیل همبستگی بالای ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات با PR باشد (جدول 4). همانگونه که در جدول 5 دیده می‌شود در مدل چهارم با افزودن پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و پارامترهای کیفی به مدل، اندازه R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> نسبت به مدل 1 افزایش



جدول 2- ورودی مدل‌ها

مدل	ورودی‌های مدل	مدل	ورودی‌های مدل
1	رطوبت و جرم مخصوص ظاهری <sup>±</sup> (W, Pb)	10	تمام ابعاد مدل‌های پیشین به علاوه رطوبت و جرم مخصوص ظاهری (D micro M, DMWD M, W, Pb, C Psd B, D Psd B)
2	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات مدل بیرد (C Psd) (B, D Psd B)	11	بعد و پارامتر فراکتالی پریر و بیرد توزیع اندازه ذرات و ورودی‌های مدل اول (W, Pb, $\alpha$ Psd MI, DPsd MI)
3	رطوبت، جرم مخصوص ظاهری، پارامترهای کیفی (Z <sub>1</sub> , Z <sub>2</sub> , Z <sub>3</sub> , W, Pb)	12	غالب ابعاد فراکتالی مدل‌های قبلی و ورودی‌های مدل اول (Dmicro M, D MWD M, C Psd B, W, Pb, $\alpha$ Psd MI, D Psd MI)
4	تمام پارامترهای مدل 2 و 3 (D, Pb, C Psd B, Z <sub>1</sub> , Z <sub>2</sub> , Z <sub>3</sub> , W, Psd B)	13	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های درشت مدل پریر و بیرد و پارامترهای مدل 1 ( $\alpha$ MWD MI, D MWD MI, W, Pb, $\alpha$ Psd MI, D psd MI)
5	رطوبت، جرم مخصوص ظاهری، شن و رس (Clay, Sand, W, Pb)	14	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های ریز مدل پریر و بیرد و پارامترهای مدل 1 (W, Pb, $\alpha$ micro MI, D micro MI, $\alpha$ psd MI, D psd MI)
6	بعد فراکتالی خاکدانه‌های ریز مدل تیلر و ویت کرفت و پارامترهای مدل 1 (D micro M, W, Pb)	15	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت و خاکدانه‌های ریز مدل پریر و بیرد و پارامترهای مدل 1 ( $\alpha$ MWD MI, D MWD MI, W, Pb, $\alpha$ micro MI, D micro MI)
7	بعد فراکتالی تیلر و ویت کرفت خاکدانه‌های درشت، MWD و پارامترهای مدل 1 (DMWD M, W, Pb, MWD)	16	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های درشت مدل بیرد و پارامترهای مدل 1 ( $\alpha$ MWD MI, D MWD MI, W, Pb, $\alpha$ Psd MI, D Psd MI)
8	خاکدانه‌های ریز و تمام پارامترهای مدل 1 و 2 (D micro M, W, Pb, C Psd B, D, Psd B)	17	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های ریز مدل بیرد و پارامترهای مدل 1 ( $\alpha$ psd B, D psd B, $\alpha$ micro B, D micro B, W, Pb)
9	بعد فراکتالی تیلر و ویت کرفت خاکدانه‌های درشت و تمام پارامترهای مدل 1 و 2 (DMWD M, W, Pb, C Psd B, D, Psd B)	18	پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت و خاکدانه‌های ریز مدل بیرد و پارامترهای مدل 1 ( $\alpha$ micro B, D micro B, $\alpha$ MWD B, D MWD B, W, Pb)

±. توصیف علائم در جدول 1 ذکر شده است.

آبه خوبی افزایش دهد (به ترتیب از 0/30 به 0/38 و از 0/18 به 0/30) که می‌تواند وابسته به رابطه بعد فراکتالی خاکدانه‌ها با فرایند خاکدانه‌سازی باشد. در واقع پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها (ریز

در مدل دهم افزودن پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات (مدل بیرد) و توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز و خاکدانه‌های درشت (مدل تیلر و ویت کرافت) نیز توانسته میزان  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  را نسبت به مدل

و دوازدهم به ترتیب میزان آماکه از 12/39- در مدل اول به 18/60-، 18/60- و 19/84- کاهش یافته است که بهبود قابل توجه و معنی‌داری را نشان می‌دهد. زیرا افزایش بعد فراکتالی میزان رس بالای خاک را نشان می‌دهد که خود این رس جزء ترکیبات مهم در پیدایش خاکدانه‌ها است. ضریب بهبود نسبی (RI) نیز در مدل‌های شماره دو، چهار، هشت، نه، ده، دوازدهم، سیزده، چهارده، شانزده و هفده افزایش داشت که نشان از کاهش مجذور میانگین مربعات خطا در این مدل‌ها نسبت به مدل اول دارد. در مدل چهارم ضریب بهبود نسبی (5/7%) نشان از بهبود این مدل با افزودن پارامترهای کیفی و پارامترهای فراکتالی مدل ببرد دارد.

و درشت) ساختمان خاک را کمی می‌کنند. بنگوق و همکاران (2001) نیز گزارش کردند که PR تحت تاثیر ساختمان خاک و BD است. بنابراین نتایج این تحقیق در راستای نتایج محققان فوق است. چرا که با نگاهی به آماکه آکایک در جدول 5 می‌توان این نکته را دریافت که با افزودن ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها به مدل پایه، در اکثر مدل‌ها بهبود برآورد PR در سطح احتمال 5% معنی دار بوده است. در مدل‌های دوم، چهارم، هشتم، نهم، دهم، دوازدهم، سیزدهم، چهاردهم، شانزدهم و هفدهم، افزوده شدن ابعاد فراکتالی به مدل پایه باعث بهبود معنی دار دقت مدل‌ها در سطح احتمال 5% شده است. در مدل‌های چهارم، دهم

جدول 3- ویژگی‌های متغیرها

متغیر	میانگین	میان	انحراف استاندارد	حد اقل	حداکثر	متغیر	میانگین	میان	انحراف استاندارد	حد اقل	حداکثر
Z <sub>1</sub> <sup>±</sup>	5/45	5	1/74	2	10	C Psd B	1/09	1/1	0/07	0/95	1/22
Z <sub>2</sub>	7/43	5	4/34	2	20	D Psd B	2/76	2/78	0/1	2/51	2/92
Z <sub>3</sub>	3/4	3	1/08	1	5	D micro M	2/78	2/8	0/07	2/58	2/9
W (g g <sup>-1</sup> )	6/63	5/97	3/79	1/76	16/7	α micro MI	0/5	0/48	0/14	0/28	0/94
PR (kPa)	1295/31	1210	635/43	201/11	2610	D micro MI	2/73	2/75	0/1	2/48	2/88
Clay (%)	22/06	20	12/2	5/89	63/9	C micro B	1/03	1/02	0/08	0/87	1/28
Silt (%)	38/37	42/26	16/03	0/95	61/9	D micro B	2/72	2/73	0/1	2/48	2/88
Sand (%)	39/61	35/42	19/33	9/61	81/7	D MWD M	3/7	3/8	0/29	2/72	3/8
MWD (mm)	2/6	2/22	1/7	0/21	5/54	c MWD B	0/14	0/15	0/1	0/01	0/34
BD (Mg m <sup>-3</sup> )	1/6	1/61	0/1	1/36	1/76	D MWD B	2/28	2/67	0/88	0/24	2/96
α Psd MI	0/36	0/34	0/14	0/15	0/94	α MWD MI	7/71	1/68	13/27	0/11	11/12
D Psd MI	2/76	2/78	0/1	2/51	2/92	D MWD MI	2/28	2/67	0/88	0/23	2/95

<sup>±</sup> توصیف علائم در جدول 1 ذکر شده است.

آماکه‌های یاد شده بهبودی نیافتند. شاید دلیل این نتیجه این باشد که PR متأثر از بافت و ساختمان خاک است (بنگوق و همکاران 2001). به همین دلیل استفاده همزمان از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها موجب بهبود تخمین PR گردید.

پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و توزیع اندازه خاکدانه‌ها موجب افزایش صحت و قابلیت اعتماد مدل‌ها می‌گردند و کاهش خطای برآورد را به

از مدل‌های 13 تا 18 این نکته دریافت شد که هرگاه از پارامترهای توزیع اندازه ذرات به همراه پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز و درشت با هم، برای برآورد PR بهره‌گیری شود میزان آماکه‌های R<sup>2</sup>، R<sup>2</sup><sub>adj</sub> و RI افزایش می‌یابد. اما هرگاه از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت و ریز با یکدیگر، برای برآورد PR بهره‌گیری شود اندازه

باشد، که شاید یکی از دلایل این یافته، تک پارامتری بودن این مدل نسبت به دو مدل دیگر (که هر دو دارای دو پارامتر برآورد شده هستند)، باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

افزودن پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات مدل بیرد و مدل پریر و بیرد به ورودی‌های مرسوم برآورد کننده PR باعث بهبود معنی‌دار معیارهای ارزیابی صحت مدل‌ها مانند  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$ ,  $RI$  و  $RMSE$  گردید. افزودن پارامترهای کیفی خاک به همراه پارامترهای توزیع اندازه ذرات نیز می‌تواند آماره‌های یاد شده را بطور معنی‌داری بهبود دهد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که هرگاه از پارامترهای توزیع اندازه ذرات با پارامترهای توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت یا ریز به عنوان ورودی بهره‌گیری شود، برآورد PR بهبود معنی‌داری پیدا می‌کند. با بررسی و مقایسه نوع مدل‌های بکار رفته در این پژوهش نیز می‌توان دریافت که پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات و توزیع اندازه خاکدانه‌های ریز و درشت مدل بیرد، نسبت به مدل پریر و بیرد در بیشتر مدل‌ها برتری محسوسی دارد. با افزودن مدل تیلر و ویت‌کرفت بهبودی در مدل‌ها ایجاد نشد و این مدل برای برآورد PR پیشنهاد نمی‌شود. از آن جایی که مدل‌های فراکتالی بسیاری در پژوهش‌های گوناگون برای توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها ارائه شده است، بنابراین بهتر است که از دقیق‌ترین این مدل‌ها در چنین مطالعاتی بهره‌گیری شود.

همراه دارند. احتمالاً دلیل آن قابلیت مدل‌های فراکتالی در مدل‌سازی PSD و توزیع اندازه خاکدانه‌ها است. داسیلوا و کی (1997) نیز PR را از طریق یک رابطه رگرسیونی به صورت تابعی از BD و رطوبت خاک به دست آوردند. آن‌ها ضرایب مدل خود را توسط توابع انتقالی با استفاده از جزء رس و ماده آلی تخمین زدند. بنابراین همانگونه که در این تحقیق به دست آمد روابط آن‌ها حاکی از آن است که بافت و ساختمان خاک عوامل اصلی مؤثر بر PR می‌باشند. بهره‌گیری از پارامترهای فراکتالی PSD و توزیع اندازه خاکدانه‌ها برای برآورد PR توصیه می‌گردد. با مقایسه آماره‌های مدل 5 (جدول 5) که شامل اجزاء بافت خاک هستند با آماره‌های مدل‌هایی که از پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات بهره‌گیری شده است (مانند مدل‌های 2، 4 و 14) این نکته دریافت می‌شود که پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات، اطلاعات کامل‌تری از بافت خاک را در اختیار مدل قرار می‌دهد و نسبت به اجزاء بافت خاک پارامتر قابل اطمینان تری می‌باشند. یوسویکز و لیپیک (2009) نیز تاثیر تراکم بر توزیع مکانی PR را توسط ابعاد فراکتالی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در جهت عمودی با افزایش تراکم بعد فراکتالی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین نتیجه‌گیری کردند که بعد فراکتالی شاخص مناسبی برای ارزیابی سطح تراکم خاک می‌باشد.

مدل تیلر و ویت‌کرفت به تنهایی باعث بهبود اندازه آماره‌های یاد شده نشد و نتوانست شاخص خوبی برای توزیع اندازه خاکدانه‌های درشت و ریز

جدول 4- همبستگی خطی مقاومت فروروی با 23 متغیر مدل‌های رگرسیونی

Sand % <sup>±</sup>	Silt %	Clay %	W	Z <sub>3</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub>	PR	
-۰/۳۳*	۰/۳۰*	۰/۱۲	-۰/۳۰*	۰/۱۳	-۰/۰۵	۰/۰۸	-	PR
BD	D Psd B	C Psd B	D micro M	DMWD M	α Psd MI	MWD	DPsd MI	PR
۰/۱۴	۰/۳۶**	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۳۶**	PR
D MWD MI	α MWD MI	D MWD B	C MWD B	D micro B	C micro B	D micro MI	α micro MI	PR
-۰/۰۴	-۰/۱۵	-۰/۰۴	-۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۰۸	PR

<sup>±</sup>کلیه علائم اختصاری در جدول 1 آورده شده است.

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد.

جدول 5- مدل‌های برازش شده بر پارامترهای ورودی و آماره‌های مربوط به هر مدل

شماره مدل	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	Model	R <sup>2</sup>	Ra <sup>2</sup>	RMSE	RI	AIC
۱	-۰/۰۱	-۰/۳۱	۰/۰۴	۰/۰۴	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۱/۰۹	۲/۳۹	-۱/۱۱			$a+b/x_1+c/x_1^2+d/x_1^3+e/x_1^4+f \times x_2+g \times x_2^2+h \times x_2^3+i \times x_2^4$	۰/۳۰۷	۰/۱۸۱	۰/۸۰	۰/۸۰	-۱۷/۳۹
۲	-۱۷/۴۲	۰/۰۱	-۰/۴۲	۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۰۰۰۰۰	۴۳/۱۸	-۳۷/۹۰	۱۰/۱۷	-۲/۸۰	۰/۱۹	$a+b/x_1+c/x_1^2+d/x_1^3+e/x_1^4+f/x_1^5+g \times x_2+h \times x_2^2+i \times x_2^3+j \times x_2^4+k \times x_2^5$	۰/۳۷۰	۰/۲۲۶	۰/۷۸۳	۰	-۱۷/۹۳*
۳	۰/۳۸	-۰/۱۷	۱/۱۶	-۱/۴۶	۰/۳۰	-۱/۰۹	-۱/۰۹					$\exp(a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f)$	۰/۷۸۳	۰/۲۰۷	۰/۸۳۹	-۱/۷۷%	۲۹/۳۴
۴	۰/۲۷	-۰/۲۹	-۰/۲۹	-۰/۳۴	۰/۰۹	-۰/۰۳	۰/۳۰	-۰/۸۳				$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g \times x_7+h$	۰/۳۸۳	۰/۲۸۷	۰/۷۷۸	۵/۷%	-۱۸/۴۰ *
۵	-۰/۳۶	۰/۳۰	-۰/۳۰	-۰/۵۸	۰/۸۸	۰/۰۹	۰/۰۹					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e$	۰/۳۰۶	۰/۳۴۸	۰/۸۷۵	-۰/۱%	-۱۲/۳۹
۶	۰/۱۵	-۰/۳۵	۰/۲۲	-۲/۹۷	-۰/۰۴	-۰/۰۴						$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e$	۰/۱۶۴	۰/۱۱۳	۰/۹۰۶	-۹/۸%	-۲/۴۶
۷	-۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۰۴	-۰/۰۴						$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e$	۰/۱۹۰	۰/۱۴۱	۰/۸۹۰	-۷%	-۴/۳۵
۸	۰/۱۷	-۰/۳۶	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۳۹	۰/۳۹	-۴/۵۸					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f$	۰/۳۲۲	۰/۲۵۰	۰/۸۱۶	۱/۱%	-۱۳/۵۵*
۹	۰/۲۳	۰/۳۷	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۱۹	-۱/۲۷					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f$	۰/۳۴۲	۰/۲۷۲	۰/۸۰	۳/۱%	-۱۵/۶۵*
۱۰	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۳۹	-۵/۶۲					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g$	۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۷۷۸	۵/۶%	-۱۸/۶۰*
۱۱	-۰/۳۳	-۰/۳۳	-۰/۱۵	۰/۳۲	-۰/۸۳	-۰/۸۳						$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e$	۰/۲۹۷	۰/۲۳۸	۰/۸۳۱	-۰/۸%	-۱۱/۶۲
۱۲	۰/۱۱	۰/۳۲	۷/۲۲	۰/۳۴	-۰/۲۹	۰/۲۷	-۰/۰۹					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g \times x_7+h$	۰/۳۹۵	۰/۲۸۵	۰/۷۴۹	۶/۷%	-۱۹/۸۳*
۱۳	-۰/۹۲	-۰/۹۲	۳/۵۳	۰/۰۰۱	-۰/۳۷	۰/۱۲	-۹/۵۳					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g$	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۸۰	۷/۵%	-۱۵/۶۵*
۱۴	-۱/۴۶	-۱/۴۶	۶/۳۶	۱/۳۳	-۰/۲۹	۰/۱۸	-۹/۳۳					$\exp(a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g)$	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۸۱	۲%	-۱۴/۳۳*
۱۵	-۰/۱۰	-۰/۱۰	۳/۶۱	۰/۰۰	-۰/۳۱	۰/۰۹	-۹/۲۳					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g$	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۸۵	-۳%	-۹/۲۲
۱۶	۳/۷۷	۳/۳۸	-۳/۹۷	۰/۱۴	-۰/۳۷	۰/۱۴	-۱۲/۸۸					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g$	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۷۹	۴%	-۱۴/۹۸*
۱۷	۴/۱۲	۷/۶۱	-۳/۹۱	-۴/۰۶	-۰/۳۵	۰/۱۴	-۱۰/۱۶					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g$	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۸۰	۲/۲%	-۱۵/۶۵*
۱۸	۱/۳۵	۳/۰۶	-۲/۷۳	۰/۱۴	-۰/۳۶	۰/۱۲	-۹/۲۸					$a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3+d \times x_4+e \times x_5+f \times x_6+g$	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۸۷	-۵%	-۶/۷۶

\* ترتیب متغیرهای X1 تا Xn در مدل‌ها، در جدول 2 به ترتیب از چپ به راست، برای هر شماره مدل آورده شده است.

## منابع مورد استفاده

- بیات ح، محبوبی ع، حاج عباسی م ع و مصدقی م ر، 1386. اثر سیستم‌های خاک ورزی و انواع ماشین‌های کشاورزی بر جرم مخصوص ظاهری، شاخص مخروطی و پایداری ساختمان یک خاک لوم شنی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. شماره 42 (ب). صفحه‌های 451 تا 461.
- شفیعی ع، 1375. مطالعه فراکتال‌ها و کاربرد آنها. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان.
- مسکینی ف، 1389. تجزیه علیت خصوصیات خاک موثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های شالیزاری. نشریه آب و خاک، جلد 24، شماره 6، صفحه‌های 1246 تا 1253.
- Akaike H, 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* AC-19:716-723.
- Bayat H, Neyshabouri MR, Hajabbasi MA, Mahboubi AA and Mosaddeghi MR, 2008. Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turk J Agric For* 32: 425-433.
- Bayat H, Neyshabouri MR, Mohammadi K and Nariman-Zadeh N, 2011. Estimating water retention with pedotransfer functions using multi-objective group method of data handling and ANNs. *Pedosphere* 21: 107-114.
- Bengough AG, Campbell DJ and Osullivan MF, 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. Pp 377-404. In: Smith KA and Mullins CA (eds). *Soil and Environmental Analysis*. Marcel Dekker, Inc. New York • Basel.
- Byrd CW and Cassel DK, 1980. The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. *Soil Sci* 129 : 197-204.
- Bird NRA, Perrier E and Rieu M, 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *Eur.J Soil Sci* 51: 55-63.
- Busscher WJ, 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans ASAE* 33: 519-524.
- Campbell D J, 1975. Liquid limit determination of arable topsoils using a drop-cone penetrometer. *J Soil Sci* 26:234 –240.
- Campbell DJ and Henshall JK, 2001. Bulk Density. Pp 315-348. In: Smith KA and Mullins CE (eds). *Soil and Environmental Analysis*. Marcel Dekker, Inc. New York
- Da Silva AP and Kay BD, 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci Soc Am J* 61: 877-883.
- Ersahin S, Gunal H, Kutlu T, Yetgin B and Coban S, 2006. Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. *Geoderma* 136: 588-597
- Faure AG and da Mata JDV, 1994. Penetration resistance value along compaction curves. *J. Geotech Eng* 120: 46-59.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle – Size Analysis. Pp. 255-295. In: Warren AD (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. SSSA Inc, Madison WT.
- Gerard C J, 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. *Soil Sci Soc Am Proc* 29: 641– 645.
- Grunwald S, Lowery B, Rooney DJ and McSweeney K, 2001a. Profile cone penetrometer data used to distinguish between soil materials. *Soil Till Res* 62: 27-40.
- Grunwald S, Rooney DJ, McSweeney K., and Lowery B, 2001b. Development of pedotransfer functions for a profile cone penetrometer. *Geoderma* 100: 25-47.

- Gulser C, 2006. Effect of forage cropping treatment on soil structure and relationship with fractal dimensions. *Geoderma* 131:33-44.
- Henderson C, Levett A, and Lisle D, 1988. The effect of soil water content and bulk density on the compactability and soil penetration resistance of some Western Australian sandy soils. *Aust J Soil Res* 26: 391-400.
- Horn R, 1984. The prediction of the penetration resistance of soils by multiple regression analysis. *Z Kulturtechn. Flurbereinig* 25: 377–380.
- Hwang SII, Kwang PL, Dong SL and Susan EP, 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *SSAJ*. 66:1143–1150.
- Jarvis NJ, Hollis JM, Nicholls PH, Mayer T and Evans SP, 1997. Macro – DB : a decision – support tool for assessing pesticide fate and mobility in soils. *Environmental Modeling and Software* 12: 251-265.
- Kemper WD and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. Pp: 425-442. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd ed ASA and 385A Madison WI.
- Koolen AJ and Kuipers H, 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Heidelberg: Springer- Verlag.
- Kurup PU, Voyiadjis GZ and Tumay MT, 1994. Calibration chamber studies of piezocone test in cohesive soils. *J Geotech Eng* 120: 81-107.
- Marshall TJ, Holmes JW and Rose CW, 1996. *Soil Physics*. 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge, Cambridge University Press.
- McBratney AB, Minasny B, Cattle SR and Vervoort RW, 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109:41-73.
- Millan H, Gonzalez-Posada M, Morilla AA and Perez, E, 2007. Self-similar organization of Vertisol microstructure: A pore–solid fractal interpretation. *Geoderma* 138: 185–190.
- Mullins CE, Young IM, Bengough AG, and Ley GJ, 1987. Hard-setting soils. *Soil Use Manag.* 3:79–83.
- Nemes A, Schaap MG and Wosten JHM, 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci Soc Am J* 67: 1093-1102.
- Osullivan MF and Ball BC, 1982. A comparison of five instruments for measuring soil strength in cultivated and uncultivated cereal seedbeds. *Soil Sci J* 33 : 597-608.
- Perrier E, Bird N and Rieu M, 1999. Generalizing the fractal model of soil structure: the pore-solid fractal approach. *Geoderma* 88: 137-164.
- Perrier E, Bird N, 2002. Modelling soil fragmentation: the PSF approach. *Soil Till Res* 64: 91–99.
- Perrier EMA, Bird NRA, 2003. The PSF model of soil structure: a multiscale approach. Pp. 1–18. In: Pachepsky Ya, Radcliffe DE, Selim HM (eds). *Scaling Methods in Soil Physics*. CRC Press, Boca Raton, FL,
- Perfect E, Rasiyah V and Kay BD, 1992. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil Sci Soc Am J* 56: 1407-1409.
- Pidgeon JD and Soane BD, 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono-culture system. *J Agric Sci* 88: 431-442.
- Puppala AJ, Acar YB and Tumay MT, 1995. Cone penetration in very weakly cemented sand. *J Geotech Eng* 121: 589-600.
- Schoeneberger PJ, Wysocki DA, Benham EC and Brooderson DE, 1998. *Field book for describing and sampling soils*. Natural Resources Conservation Service, USDA, Natural Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- To J and Kay BD, 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma* 126: 261-276.
- Tyler SW and Wheatcraft SW, 1990. Fractal process in soil water retention. *Water Resour Res* 26: 1047-1054.

- Tyler SW and Wheatcraft SW, 1992. Fractal scaling of soil particle-size distribution: analysis and limitations. *Soil Sci Soc Am J* 56: 362-369.
- Upadhyaya SK, Kemble LJ and Collins NE, 1982. Cone index prediction equations for Delaware soils. *ASAE paper*. 82: 1452-1456.
- Usowicz B, and Lipiec J, 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity* 6: 263–271.
- Vaz CMP, Luis HB 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 Till Res* 60: 35-42.
- Wosten JHM, Pachepsky Y and Rawls WJ, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J Hydrol* 251: 123-150.