

ارزیابی کارایی مدل‌های فرکتالی در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و رابطه بین بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی با این پارامترها

شیوا محمدیان خراسانی^۱، مهدی همایی^{۲*} و ابراهیم پذیرا^۳

(۱) دانشجوی دکتری؛ گروه خاکشناسی؛ دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

(۲*) استاد؛ گروه آبیاری و زهکشی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: mhomae@modares.ac.ir

(۳) استاد؛ گروه خاکشناسی؛ دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

چکیده

روابط آب و خاک به قدری پیچیده هستند که پیشرفته‌ترین مدل‌های ریاضی نیز به سختی قادر به شبیه‌سازی دقیق آن‌ها می‌باشند. منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع، از جمله عوامل مهم در بررسی حرکت آب در خاک هستند. به علت تغییرپذیری بالا و پیچیدگی خاک، بدست آوردن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌طور مستقیم دشوار، وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و بنابراین لازم است با استفاده از روش‌های غیرمستقیم تخمین زده شوند. هدف از این پژوهش، تعیین بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل‌های فرکتالی و بررسی رابطه بین بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی با پارامترهای هیدرولیکی، درصد رس، سیلت و شن خاک در یک پهله گسترده بود. بدین منظور، ۴۰ نمونه خاک با بافت‌های مختلف از چهار منطقه کرج، قزوین، ایوانکی و کرمانشاه گردآوری و توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری، کربن آلی، شوری، pH و رطوبت آن‌ها در مکش‌های مختلف اندازه‌گیری گردید. سپس پارامترهای مدل نگهداشت van Genuchten و مدل‌های فرکتالی Tyler-Wheatcraft و Rieu-Sposito برای توزیع اندازه ذرات خاک محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل نگهداشت van Genuchten رفتاری فرکتالی داشته و با استفاده از مدل‌های فرکتالی می‌توان پارامترهای آن را به‌صورتی کمی بیان کرد. همچنین نتایج نشان داد که هر چه مقدار شن در خاک افزایش یابد، بُعد فرکتالی کاهش می‌یابد، لیکن درصد رس با بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft رابطه‌ای مستقیم و خطی دارد. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش مقدار رس در خاک‌های مورد مطالعه، مقدار بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft (D_m) افزایش و با افزایش مقدار شن، بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft (D_m) کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: بافت خاک؛ بُعد فرکتالی؛ منحنی نگهداشت؛ هندسه فرکتالی؛ ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

مقدمه

و آلاینده‌ها در خاک دارد. منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک از اطلاعات پایه‌ای برای بررسی حرکت آب، املاح و آلاینده‌ها در ریشه‌گاه‌ها بوده که بیان کمی آن‌ها برای هر گونه برنامه مدیریتی ضروری است. این دو تابع، توابعی بسیار مهم بوده که اطلاعاتی سودمند

خاک محیطی بسیار پیچیده است که برای کشاورزی و محیط‌زیست با اهمیت و یکی از ارکان بنیادین زیست‌بوم‌های طبیعی می‌باشد (Lal and Pierce, 1991; Veltri et al., 2013). تخمین درست پارامترهای هیدرولیکی خاک اهمیتی فراوان در مدل‌سازی حرکت آب

پیچیده است که در سر تا سر محدوده‌ای وسیع از مقیاس‌ها به‌طور آماری تکرار شده و باعث افزایش مقیاس تغییرناپذیری می‌گردد. تغییرپذیری در محیط‌های متخلخلی همچون محیط غیرهمگن خاک، باید از طریق بُعدهای فرکتالی که در مقیاس‌های مختلف متفاوت هستند، مورد مطالعه قرار گیرد (Seuront *et al.*, 1999; Lee, 2002; Lin, 2008). بُعد فرکتالی، توان مقیاس‌سازی است که دارای قابلیت اندازه‌گیری درجه بی‌نظمی محیط می‌باشد (Turcotte, 1986; Wu *et al.*, 1993).

کاربرد روش فرکتالی، منجر به ارائه توابعی کمی برای منحنی رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی غیراشباع و اشباع خاک و توزیع اندازه تخلخل درشت شده است. تئوری فرکتال، توانایی مدل کردن ساختمان خاک را داشته (Tyler and Wheatcraft, 1990) و توانسته است غیریکنواختی ساختمان خاک را به رفتار ویژه‌ای از خاک پیوند دهد (Young *et al.*, 2001). پژوهشگران از فرکتال‌ها برای بیان کمی رابطه فیزیکی آب و خاک (Perrier *et al.*, 1996; Giménez *et al.*, 1997)، تخمین منحنی رطوبتی خاک و نفوذپذیری (Tyler and Wheatcraft, 1992; Perfect and Kay, 1991; Rieu and Sposito, 1991; Perfect *et al.*, 1992; Eghball *et al.*, 1993; Rasiyah *et al.*, 1993)، نگهداشت و حرکت آب در خاک (Tyler and Wheatcraft, 1990; Rieu and Sposito, 1994) استفاده کرده‌اند.

مقیاس‌سازی روشی است که در آن با استفاده از فاکتور مقیاس، ویژگی‌های خاک‌های مختلف به یکدیگر ارتباط داده می‌شوند. روش‌های مقیاس‌سازی بر پایه نظریه محیط‌های متشابه گسترش یافته‌اند. در این روش‌ها توابع هیدرولیکی خاک‌های مختلف، این توانایی را دارند که با نسبت‌هایی از یک طول مشخص فیزیکی (فاکتور مقیاس) بر روی هم واقع و با یک منحنی نماینده (منحنی مرجع) نمایش داده شوند (Warrick *et al.*, 1977).

محمدیان خراسانی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به تعیین پارامترهای فرکتالی پایداری خاکدانه‌ها و مقایسه آن

درباره ویژگی‌های فیزیکی خاک و مدیریت آب و خاک در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌دهند.

بافت و ساختمان خاک دو ویژگی فیزیکی اثرگذار بر منحنی رطوبتی خاک بوده به‌گونه‌ای که در یک بافت ثابت، تحت تأثیر عوامل تغییردهنده ساختمان خاک، تغییر می‌کند. در واقع منحنی رطوبتی در مکش‌های زیاد، بیش‌تر تحت تأثیر بافت و سطح ویژه خاک می‌باشد (Hillel, 1998; Ghanbarian-Alavijeh *et al.*, 2010). اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی بسیار گران، وقت‌گیر و متغیر است (Dirksen, 1991). از این‌رو، همواره تلاش بر آن بوده تا از روش‌های غیرمستقیم برای تخمین آن استفاده شود. بدین منظور پژوهش‌های فراوانی پیرامون تخمین این ویژگی با استفاده از پارامترهای زودیافتی همچون درصد ذرات رس، سیلت و شن، جرم ویژه ظاهری خاک، ماده آلی و منحنی دانه‌بندی صورت گرفته که نتیجه این تلاش‌ها ارائه مدل‌های تجربی متعددی بوده است. چندین مدل تجربی نیز برای توضیح کمی منحنی رطوبتی خاک ارائه شده است (Brooks and Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980). از دیگر سو، تمام ویژگی‌های هیدرولیکی، مشخصات آب و خاک، هدایت هیدرولیکی و نفوذ آب به خاک ارتباطی نزدیک با هندسه محیط متخلخل دارند (Burdine, 1953; Brooks and Corey, 1966). محیط‌های متخلخلی همچون خاک، سیستم‌هایی ناهمگن با اجزای متعدد و متفاوت هستند که ماهیت پیچیده آن‌ها هرگونه پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی را پیچیده می‌کند (Van Damme, 1995). بنابراین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و ویژگی‌هایی هستند که می‌توان بر پایه اندازه ذرات خاک آن‌ها را برآورد کرد (Millan *et al.*, 2003). در دو دهه اخیر، روش فرکتالی به‌عنوان ابزاری مناسب برای مدل کردن پدیده‌های پیچیده به‌کار گرفته شده است.

هندسه فرکتالی ایده‌هایی جدید برای توصیف ریاضی بی‌نظمی و ناهمگنی زیاد در محیط‌های متخلخل مانند خاک را فراهم می‌کند. هندسه فرکتالی، هندسه‌ای بسیار

و Miller (۱۹۵۶) استفاده کردند. لیکن این روش تنها برای محیط‌هایی کاربرد دارد که از لحاظ هندسی، متشابه باشند. Millan و همکاران (۲۰۰۳) با مطالعه ماهیت فرکتالی بافت‌های مختلف خاک بیان کردند که بُعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات با مقادیر رس، همبستگی خطی معنی‌داری دارد به گونه‌ای که با افزایش مقدار رس، بُعد فرکتالی افزایش و با افزایش مقدار شن، کاهش می‌یابد. Zhang و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر سه سطح مختلف تراکم را بر ویژگی‌های هیدرولیکی دو نمونه خاک لوم سیلتی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تراکم خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی آن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. توان منحنی رطوبتی خاک، مفهومی فیزیکی داشته لیکن اندازه‌گیری مستقیم آن هم در صحرا و هم در آزمایشگاه دشوار و زمان‌بر است. یکی از روش‌های سودمند برای تخمین توان منحنی رطوبتی (بُعد فرکتالی)، استفاده از توزیع اندازه منافذ به کمک آنالیز تصویر است (Bartoli et al., 2005).

Veltri و همکاران (۲۰۱۳) به تجزیه و تحلیل منحنی رطوبتی با استفاده از هندسه فرکتالی پرداختند. در این پژوهش، رابطه بین منحنی رطوبتی و بُعد فرکتالی بررسی گردید و دریافتند که مقیاس‌بندی فرکتالی منحنی رطوبتی، امکان اندازه‌گیری آب خاک در شرایطی که دارای سطح بسیار پایین می‌باشد را فراهم می‌کند. به دلیل ناهمگن و ناهمگون بودن شرایط واقعی خاک و تغییرپذیری زیاد منحنی رطوبتی خاک، برای شبیه‌سازی آن نیاز به اندازه‌گیری‌های فراوان بوده که مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است.

در دو دهه گذشته، از روش‌های فرکتالی به عنوان ابزاری نوین برای مدل‌سازی در مسائل مربوط به خاک و آب استفاده شده و توابعی برای منحنی رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، غیراشباع، هدایت آبی و توزیع اندازه منافذ درشت نیز پیشنهاد شده است. در این پژوهش تلاش گردیده تا با استفاده از مدل‌های فرکتالی پارامترهای

با شاخص‌های کلاسیک سنجش خاکدانه‌ها و تعیین رابطه این شاخص‌ها با بُعد فرکتالی خاکدانه‌ها پرداختند. آنان چنین نتیجه‌گیری کردند که بُعد‌های فرکتالی دو مدل تعداد-اندازه Mandelbrot در سری الک خشک و مدل تعداد-اندازه Rieu-Sposito در سری الک تر با دو شاخص تجربی میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها بیش‌ترین همبستگی را دارند.

Arya و Paris (۱۹۸۱) منحنی رطوبتی خاک را بر پایه مدل‌سازی توزیع خلل و فرج خاک به کمک توزیع بافت و جرم ویژه خاک پیش‌بینی کردند. توزیع اندازه ذرات از بنیادی‌ترین مشخصه‌های فیزیکی خاک بوده که همواره به‌عنوان اطلاعات پایه‌ای برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک همچون منحنی نگهداشت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهشگران گزارش کرده‌اند که منحنی رطوبتی خاک شکلی همانند منحنی توزیع اندازه خاکدانه‌ها دارد (Arya and Paris, 1981) بنابراین مدل‌های توزیع اندازه خاکدانه‌ها برآوردگری خوب برای منحنی رطوبتی خاک می‌باشند (Lee and Ro, 2014). از این‌رو، مدل‌های توزیع اندازه خاکدانه‌ها به دو گروه کلی مدل‌های فرکتالی و غیرفرکتالی طبقه‌بندی می‌شوند. از مدل‌های فرکتالی می‌توان به مدل Tyler و Wheatcraft (۱۹۹۲) و مدل‌های غیرفرکتالی، مدل Van Genuchten (۱۹۸۰) اشاره کرد.

در پژوهشی Assouline و همکاران (۱۹۹۷) دریافتند که pH خاک، مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی بر چگونگی تراکم خاک تأثیرگذار بوده و بنابراین منحنی رطوبتی خاک نیز با تغییر ساختمان خاک تغییر خواهد کرد. بنابراین منحنی رطوبتی باید دوباره پس از تراکم، تعیین گردد که خود نیازمند صرف هزینه و زمان بسیار زیادی می‌باشد. Tuli و همکاران (۲۰۰۱) برای مقیاس‌سازی توأمان منحنی رطوبتی و توابع هدایت هیدرولیکی خاک با یک سری فاکتور مقیاس مشترک، از ترکیب روش ارائه شده توسط Miller و Kosugi (۱۹۹۸) با نظریه

کدام از متغیرها در مدل، نرم‌افزار پردازش داده‌ها را انجام و با آزمون و خطا، مقادیر نهایی را برآورد و در هر تکرار، همزمان با برآورد متغیرها تابع هدف را نیز محاسبه می‌کند. پایان محاسبات هنگامی است که مقادیر برآورد شده به مقداری ثابت رسیده و تابع هدف نیز به سمت کمینه میل کند. نرم‌افزار RETC نیز همین شیوه را برای برآورد پارامترهای منحنی نگهداشت به کار می‌گیرد.

برای محاسبه بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی از دو مدل فرکتالی Tyler-Wheatcraft و Rieu-Sposito استفاده گردید. برای توصیف اندازه خلل و فرج خاک، Tyler و Wheatcraft از الگوی فرس سیرپینسکی بهره گرفته و رابطه‌ای توانی مشابه معادلات تجربی Brooks-Corey (۱۹۶۴) و Campbell (۱۹۷۴) ارائه کردند، که بیان ریاضی آن به صورت زیر ارائه داده شد:

$$\theta = \theta_s \left(\frac{h}{h_0}\right)^{D_m-3} \quad (2)$$

که در آن h پتانسیل ماتریک، h_0 پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک، θ مقدار رطوبت خاک، θ_s مقدار رطوبت خاک در حالت اشباع و D_m بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. توان (D_m-3) با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\log\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right) = (D_m - 3) \log\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (3)$$

یکی دیگر از مدل‌های فرکتالی، مدلی است که توسط Rieu-Sposito ارائه شده است:

$$h = h_0 \left[(1-f) + \theta \right]^{1/D_r-3} \quad (4)$$

که در آن h پتانسیل ماتریک، h_0 پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک، θ مقدار رطوبت خاک، f تخلخل خاک و D_r بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد.

عبارت (D_r-3) توان مدل Rieu-Sposito بوده که خود از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\log\left(\frac{h}{h_0}\right) = \left(\frac{1}{D_r} - 3\right) \log[(1-f) + \theta] \quad (5)$$

نتایج و بحث

هیدرولیکی خاک برآورد و رابطه‌ای کاربردی برای بیان بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی ارائه شود. بدین ترتیب هدف از این پژوهش، بدست آوردن بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل‌های فرکتالی در کلاس‌های بافتی رسی، لومی و رسی لومی سیلتی و تعیین رابطه بُعد فرکتالی با پارامترهای هیدرولیکی مدل van Genuchten و فراوانی نسبی ذرات خاک بود.

مواد و روش‌ها

تعداد ۴۰ نمونه خاک با بافت‌های مختلف از لایه‌های سطحی واقع در چهار منطقه ورامین (ایوانکی)، قزوین، کرج و کرمانشاه برداشت (از هر منطقه ۴۰ نمونه) و درون کیسه‌های پلاستیکی نگهداری و به آزمایشگاه منتقل گردید. سپس بافت خاک‌ها به روش هیدرومتری، مواد آلی به روش Walkly and Blake، هدایت الکتریکی (EC) به وسیله دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، pH خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. سپس پارامترهای مدل نگهداشت van Genuchten با استفاده از افزونه Solver و نرم‌افزار RETC بدست آمد. مدل پارامتریک نگهداشت van Genuchten به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (ah)^n]^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (1)$$

که در آن n و m پارامترهای شکل منحنی رطوبتی، α (L^{-1}) پارامتر نقطه عطف منحنی که تقریباً برابر با عکس نقطه ورود هوا به خاک است، h پتانسیل ماتریک، θ_s و θ_r رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع خاک ($L^3.L^{-3}$) می‌باشند.

افزونه Solver از جعبه‌ابزارهای نرم‌افزار Excel بوده که با استفاده از آن می‌توان مسائلی همچون بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی خطی را حل کرد. در Solver از روش تکرار برای فرآیند برازش متغیرها استفاده می‌شود. بدین منظور باید مقادیر اولیه مناسب برای هر کدام از متغیرها انتخاب و در برنامه وارد شوند. پس از وارد کردن مقادیر اولیه هر

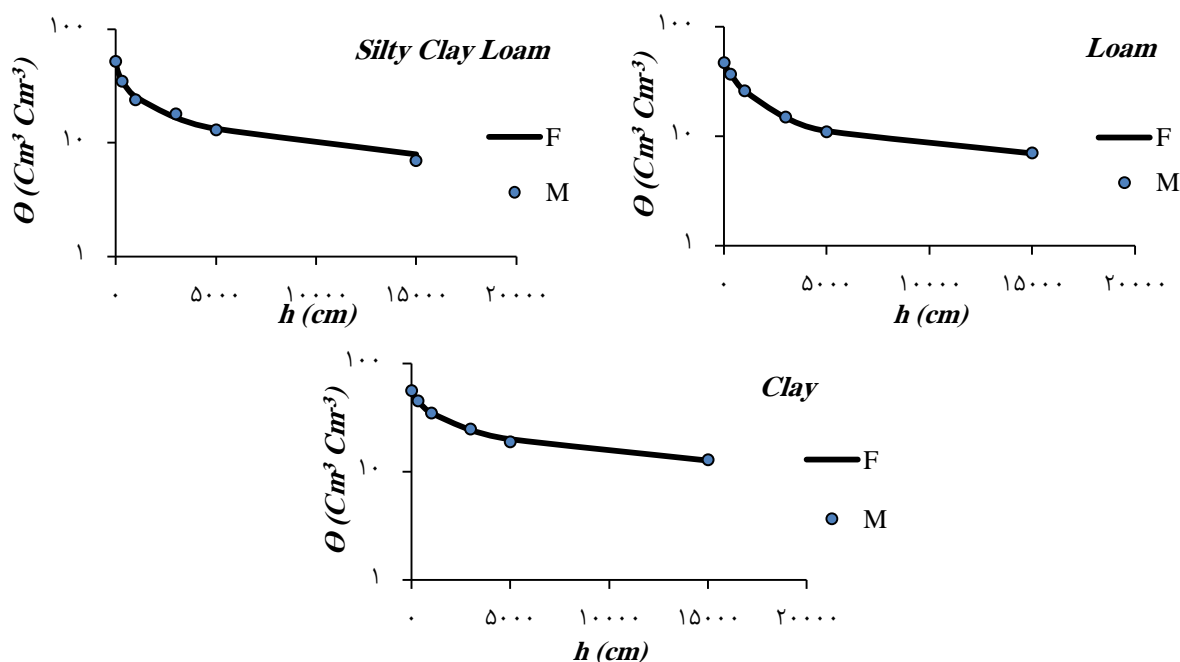
فرکتالی منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل Rieu-Sposito در دامنه ۲/۸۲۴ تا ۲/۹۵۰ تغییر می‌کند. Tyler و Wheatcraft (۱۹۹۰) با استفاده از توزیع جرم ذرات خاک و Rieu و Sposito (۱۹۹۱) با استفاده از توزیع جرم خاکدانه‌ها گزارش کرده‌اند که بُعد فرکتالی خاک می‌تواند در محدوده ۲ تا ۳ متغیر باشد که با نتایج حاصل از تحقیق حاضر همخوانی دارد.

در این پژوهش جهت ارزیابی، از منحنی رطوبتی خاک برای بافت خاک‌های مختلف تحت شرایط مختلف ساختمانی استفاده گردید. در شکل ۱، منحنی رطوبتی تعدادی از نمونه‌ها با بافت‌های مختلف و نیز منحنی برازش یافته با استفاده از افزونه Solver نشان داده شده است.

پراکنش آماری اجزای تشکیل‌دهنده خاک به همراه بُعدهای فرکتالی بدست آمده از مدل‌های فرکتالی در جدول ۱ نشان داده شده است. بررسی ارقام مندرج در این جدول نشان می‌دهد که رس دارای کمینه ۲، بیشینه ۵۰ و میانگین ۲۴/۳۷ می‌باشد. سیلت با کمینه ۰، بیشینه ۷۲ و میانگین ۲۹/۴۷ و شن دارای کمینه ۱۲، بیشینه ۹۷ و میانگین ۴۶/۱۷ به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین میانگین می‌باشند. همچنین بُعدهای فرکتالی مدل Rieu-Sposito با میانگین ۲/۸۸۱ بیش‌تر از بُعدهای فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft با میانگین ۲/۵۲۲ می‌باشند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بُعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل Tyler-Wheatcraft در دامنه ۲/۴۰۸ تا ۲/۶۵۱ و بُعد

جدول ۱. پراکنش اندازه ذرات خاک و بُعدهای فرکتالی خاک‌های مطالعه شده

| پارامترها | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | خطای استاندارد |
|--|-------|--------|---------|--------------|----------------|
| درصد شن | ۱۲ | ۹۷ | ۴۶/۱۷ | ۲۸/۴۶۸ | ۵/۱۹۷ |
| درصد سیلت | ۰ | ۷۲ | ۲۹/۴۷ | ۲۰/۳۳۶ | ۳/۷۱۳ |
| درصد رس | ۲ | ۵۰ | ۲۴/۳۷ | ۱۳/۶۱۷ | ۲/۴۸۶ |
| بُعد فرکتالی مدل تیلر-ویت کرفت (D_m) | ۲/۴۰۸ | ۲/۶۵۱ | ۲/۵۲۲ | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۱۴ |
| بُعد فرکتالی مدل ریو-اسپوزیتو (D_r) | ۲/۸۲۴ | ۲/۹۵۰ | ۲/۸۸۱ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۰۵ |



شکل ۱. منحنی رطوبتی خاک نمونه‌های بدست آمده با استفاده از افزونه Solver (θ رطوبت، h پتانسیل ماتریک، M مقادیر اندازه‌گیری شده و F مقادیر برآورد شده)

جدول ۲. همبستگی درصد اجزای تشکیل دهنده خاک با بُعدهای فرکتالی مدل‌ها

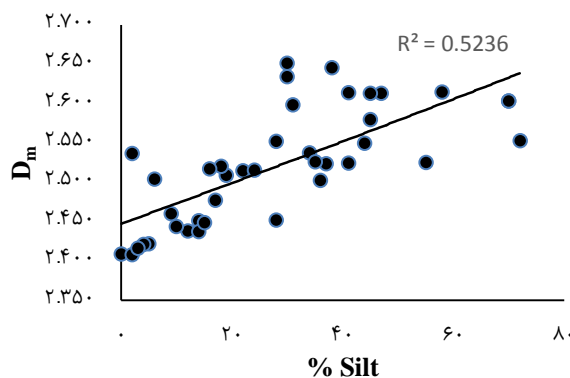
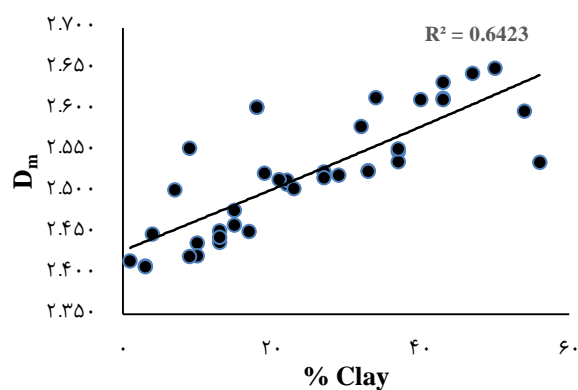
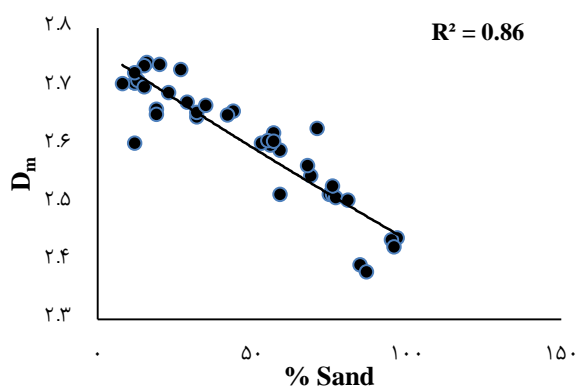
| درصد رس (% Clay) | درصد سیلت (% Silt) | درصد شن (% Sand) | مدل‌های فرکتالی |
|------------------|--------------------|------------------|--|
| ۰/۶۹۷** | ۰/۶۹۶** | ۰/۵۰۷** | بُعد فرکتالی مدل تیلر-ویت‌کرفت (D _m) |
| ۰/۴۱۳** | ۰/۵۲۱** | ۰/۷۴۱** | بُعد فرکتالی مدل ریو-اسپوزیتو (D _r) |

** نمایانگر این است که بر حسب آزمون چند دامنه دانکن در سطح ۱٪، همبستگی معنی‌داری وجود دارد.

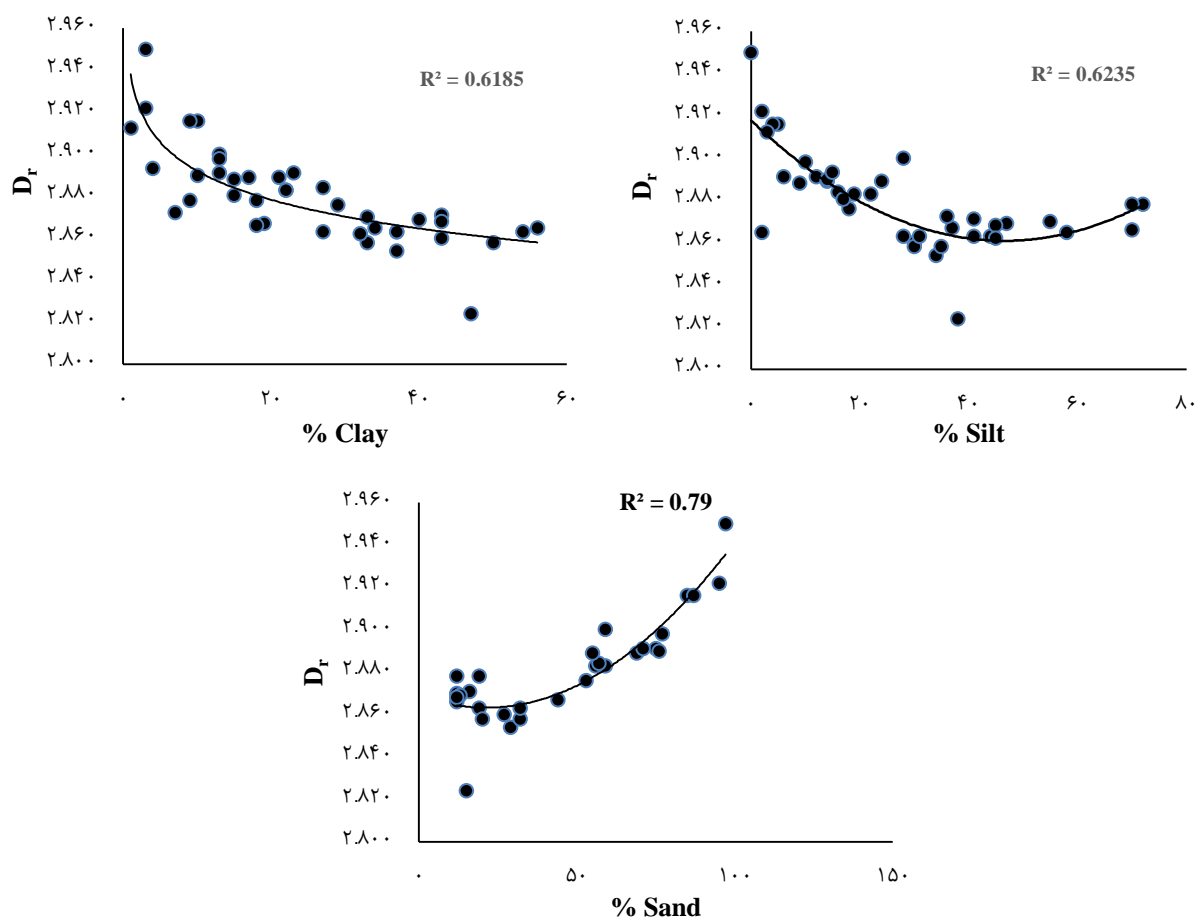
چه مقدار شن در خاک افزایش یابد، بُعد فرکتالی کاهش می‌یابد. لیکن درصد رس با بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft، رابطه‌ای مستقیم و خطی دارد. این بدین معنی است که با افزایش مقدار رس در خاک‌های مورد مطالعه، مقدار بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft (D_m) نیز افزایش و با افزایش مقدار شن، بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft (D_m) کاهش می‌یابد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌های با بافت سنگین دارای D کوچک‌تری بزرگ‌تر و خاک‌های سبک بافت دارای D کوچک‌تری هستند. لیکن در مدل Rieu-Sposito عکس این حالت دیده می‌شود (شکل ۳).

همبستگی بین درصد اجزای تشکیل دهنده خاک و بُعدهای فرکتالی حاصل از مدل‌های فرکتالی در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود درصد شن با بُعدهای فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft و درصد رس با بُعدهای فرکتالی مدل Rieu-Sposito در سطح معنی‌داری یک درصد دارای همبستگی منفی می‌باشند.

رابطه بین درصد اجزای تشکیل دهنده خاک با بُعدهای فرکتالی مدل‌های فرکتالی به همراه ضریب تبیین مدل‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، درصد شن با بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر هر



شکل ۲. رابطه بُعد فرکتالی مدل Tyler-Wheatcraft و درصد اجزای تشکیل دهنده خاک



شکل ۳. رابطه بُعد فرکتالی مدل Rieu-Sposito و درصد اجزای تشکیل‌دهنده خاک

نتیجه‌گیری

با افزایش شن در خاک، بُعد فرکتالی کاهش و با افزایش مقدار رس بُعد فرکتالی افزایش می‌یابد. بنابراین خاک‌های با بافت سنگین دارای بُعد فرکتالی بزرگ‌تر و خاک‌های سبک بافت دارای بُعد فرکتالی کوچک‌تری می‌باشند. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که بُعد فرکتالی، یک ویژگی ذاتی از ذرات خاک است که با دیگر ویژگی‌های خاک نیز مرتبط است. وجود همبستگی بین پارامترهای فرکتالی و ویژگی‌های خاک نشان‌دهنده توانایی مدل‌های فرکتالی در شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است. برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک،

بسیاری از ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفت که در این پژوهش مشخص گردید پارامترهای فرکتالی، همبستگی بالایی با ویژگی‌های خاک و پارامترهای منحنی رطوبتی دارند. بنابراین پارامترهای فرکتالی با سایر ویژگی‌های خاک رابطه‌ای تنگاتنگ داشته و می‌توان آن‌ها را جزئی از ویژگی‌های خاک به‌شمار آورد که به خوبی قادر به کمی کردن رفتار خاک خواهند بود. در نهایت با توجه به کاربرد هندسه فرکتالی در مسائل مربوط به خاک، پیشنهاد می‌شود این پژوهش با مدل‌های فرکتالی بیشتر، در مناطقی با شرایط مختلف آب و هوایی انجام و بررسی گردد.

منابع مورد استفاده

- محمدیان خراسانی، ش.، همایی، م. و پذیرا، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از مدل‌های فرکتالی و روش‌های کلاسیک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴(۳): ۳۹-۵۱.
- Arya, M.L. and Paris, J.F. 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1023-1030.
- Assouline, S., Tavares-Filho, J. and Tessier, D. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 390-398.
- Bartoli, F., Genevois-Gomendy, V., Royer, J.J., Niquet, S., Viver, H. and Grayson, R. 2005. A multiscale study of silty soil structure. *European Journal of Soil Science*, 56: 207-223.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology*. Paper No, 3, Colorado State Univ. Fort Collins, Co.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 92: 61-68.
- Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 198: 7-71.
- Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Science*. 177: 311-314.
- Crawford, J.W. 1994. The retention between structure and hydraulic conductivity of soil. *European Journal of Soil Science*, 45: 493-502.
- Dirksen, C. 1991. Unsaturated hydraulic conductivity. In: Smith KA, Mullins C.E., editors, *Soil analysis physical methods*. New York: Dekker; p. 69-209.
- Eghball, B., Mielke, L.N., Calvo, G.A. and Wilhelm, W.W. 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1337-1341.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Guan-Hua, H. and van Genuchten, M.Th. 2010. Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Pedosphere*, 20 (4): 456-465.
- Giménez, D., Perfect, E., Rawls, W.J. and Pachepsky, Y.A. 1997. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: A review. *Engineering Geology*, 48: 161-183.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego. 771pp.
- Kosugi, K. and Hopmans, J.W. 1998. Scaling water retention curves for soils with longnormal pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 1496-1504.
- Lal, R. and Pierce, F.J. 1991. The vanishing resource. pp. 1-5. In Lal, R. and Pierce, F.J.
- Lee, C.K. 2002. Multifractal characteristics in air pollutant concentration time series. *Water, Air and Soil Pollution*, 135: 389-409.
- Lee, T.K. and Ro, H.M. 2014. Estimating soil water retention function from its particle-size distribution. *Geosciences Journal*, 18(2): 219-230.
- Lin, D.C. 2008. Factorization of joint multifractality. *Physica*: 3461-3470.
- Millan, H., González-Posada, M., Aguilar, M., Domínguez, J. and Céspedes, L. 2003. On the fractal scaling of soil data, particle-size distributions. *Geoderma*, 117: 117-128.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics*, 27: 324-332.
- Perfect, E. and Kay, B.D. 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 1552-1558.
- Perfect, E., Rasiyah, V. and Kay, B.D. 1992. Fractal dimension of soil aggregate-size distribution calculated by number and mass. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1407-1409.
- Perrier, E., Sposito, G. and De Marsily, G. 1996. A computer model of the water retention curve for soils with a fractal pore size distribution. *Water Resources Research*, 32: 3025-3031.
- Rasiyah, V., Kay, B.D. and Perfect, E. 1992. Evaluation of selected factors influencing aggregate fragmentation using fractal theory. *Canadian Journal of Soil Science*, 72: 97-106.
- Rasiyah, V., Kay, B.D. and Perfect, E. 1993. New mass-based model for estimating fractal dimension of soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 891-895.
- Rieu, M. and Sposito, G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications. *Soil Science Society of America Journal*, 55(5): 1239-1244.
- Seuront, L., Schmitt, F., Lagodeuc, Y., Schertzer, D. and Lovejoy, S. 1999. Universal multifractal analysis as a tool to characterize multiscale intermittent patterns: Example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters. *Journal of Plankton Research* 21: 877-922.

- Tuli, A., Kosugi, K. and Hopmans, J.W. 2001. Similtaneous scaling of soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions assuming longnormal pore-size distribution. *Advances in Water Resources*, 24: 677-688.
- Turcotte, D.L. 1986. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysical Research*, 91: 1921-1926.
- Tyler, S.W. and Wheatcraft, S.W. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*, 26(5): 1047-1054.
- Tyler, S.W. and Wheatcraft, S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2): 362-369.
- van Damme, H. 1995. Scale invariance and hydric behavior of soils and clays. *CR Academic Science Paris*, 320: 665-681.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- Veltri, M., Severino, G., De Bartolo, S., Fallico, C. and Santini, A. 2013. Scaling analysis of water retention curves: a multi-fractal approach. *Procedia Environmental Sciences*, 19: 618-622.
- Warrick, A.W., Mullen, G.J. and Nielsen, D.R. 1977. Scaling of field measured hydraulic properties using a similar media concept. *Water Resources Research*, 13(2): 355-362.
- Wu, Q., Borkovec, M. and Sticher, H. 1993. On particle-size distributions in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4): 883-890.
- Young, I.M., Crawford, J.W. and Rappoldt, C. 2001. New method and models for characterizing structural heterogeneity of soil. *Soil and Tillage Research*, 61: 33-45.
- Zhang, Sh., Grip, H. and Lövdahl, L. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil and Tillage Research*, 90: 117-125.
- Alfaro Soto, M.A., Chang, H.K. and van Genuchten, M.Th. 2017. Fractal-based models for the unsaturated soil hydraulic functions. *Geoderma*, 306: 144-151.
- Wang, J., Qin, Q., Guo, L. and Feng, Y. 2018. Multi-fractal characteristics of three-dimensional distribution of reconstructed soil pores at opencast coal-mine dump based on highprecision CT scanning. *Soil and Tillage Research*. 182. 144-152.



ISSN 2251-7480

Evaluating the efficiency of fractal models in estimating soil hydraulic parameters and the relationship between moisture curvature fractal dimension with these parameters

Shiva Mohammadian Khorasani ¹, Mehdi Homaei ^{2*} and Ebrahim Pazira ³

1) PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2*) Professor, Department of Irrigation and Drainage, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Corresponding author email: mhomaei@modares.ac.ir

3) Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Received: 12-01-2018

Accepted: 26-02-2018

Abstract

Soil and water relations are so complex that the most advanced mathematical models can hardly be able to simulate them accurately. Retention curve and unsaturated hydraulic conductivity are among the most important factors in the study of water flow in the soil. Because the high variability and soil complexity, obtaining soil hydraulic properties directly is difficult, time consuming and costly and therefore it is necessary to estimate indirect methods. The purpose of this study was to determine the fractal dimension of soil moisture curve using fractal models and to investigate the relationship between the moisture curvature fractal dimension with hydraulic parameters, clay, silt and sandy percent in a wide area. For this purpose, some soil samples collected from different tissues from the regions of the country were collected and the variables of particle size, bulk density, organic carbon, salinity, pH and moisture content were measured in different suction. Finally, the parameters of the van Genuchten model as well as models Tyler-Wheatcraft and Rieu-Sposito fractals were calculated for soil particle size distribution. The results showed that van Genuchten model parameters have fractal behavior and can be quantified by using fractal models. The results also showed that the higher the amount of sand in the soil, the fractal decreases, but the clay content has a direct linear relationship with the Tyler-Wheatcraft fractal dimension. This means that by increasing the amount of clay in the studied soils, the fractional dimension of the Tyler-Wheatcraft (D_m) model also increases and with the increase in the amount of sand, the fractal dimension of the Tyler-Wheatcraft (D_m) model decreases.

Keywords: fractal dimension; fractal geometry; soil hydraulic properties; soil texture