



ISSN 2251-7480

## استفاده از مدل‌های فرکتالی برای کمی‌سازی ساختمان خاک و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک

سپیده مفیدی<sup>۱\*</sup>، مهناز اسکندری<sup>۲</sup>، ابراهیم پذیرا<sup>۳</sup> و مهدی همایی<sup>۴</sup>

<sup>۱\*</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی؛ واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاداسلامی؛ تهران؛ ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [sepide\\_mofidi@yahoo.com](mailto:sepide_mofidi@yahoo.com)

<sup>۲</sup> استادیار پژوهش؛ مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ کرج؛ ایران

<sup>۳</sup> استاد گروه خاکشناسی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ دانشگاه آزاداسلامی؛ تهران؛ ایران

<sup>۴</sup> استاد گروه آبیاری و زهکشی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۸

### چکیده

ساختمان خاک هم از نظر مدیریت منابع آب و خاک و هم ارتقای توان تولید پایدار، از اهمیتی فراوان برخوردار است. از آنجا که ساختمان خاک اغلب به صورتی کیفی بیان می‌شود، یکی از روش‌های نسبتاً نوین برای توصیف کمی ساختمان خاک، کاربرد مفهوم هندسه فرکتالی است. با به کار بردن هندسه فرکتالی در تعیین پایداری ساختمان خاک و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک، می‌توان به درکی بهتر از ساختمان خاک دست یافت. هدف از این پژوهش، کمی‌سازی ساختمان خاک با استفاده از مدل‌های فرکتالی و مقایسه آن‌ها با روش‌های کلاسیک بود. بدین منظور، تعداد ۳۰ نمونه از خاک سطحی یک منطقه زراعی تهیه شد. سپس با استفاده از روش الک‌های تر و خشک، میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها محاسبه گردید. آنگاه با استفاده از چهار مدل فرکتالی تعداد-اندازه و جرم-اندازه Rieu و Sposito، تعداد-اندازه Mandelbrot و جرم-اندازه Tyler و Wheatcraft بُعد فرکتالی نمونه‌ها بدست آمد. نتایج نشان داد که دامنه بُعد فرکتالی مدل جرم-اندازه Rieu و Sposito در حالت خشک از ۲/۸۶ تا ۲/۹۲ و در حالت تر از ۲/۹۰ تا ۲/۹۹ متغیر است. حال آنکه این تغییرات برای مدل Tyler و Wheatcraft در حالت خشک از ۲/۵۳ تا ۲/۷۸ و در حالت تر از ۲/۲۴ تا ۲/۵۵ بدست آمد. دامنه تغییرات در مدل تعداد-اندازه Rieu و Sposito از ۲/۷۷ تا ۳/۵۹ در حالت خشک و از ۲/۳۵ تا ۳/۱۸ در حالت تر در نوسان بود. نتایج همچنین نشان داد که دامنه تغییرات در مدل Mandelbrot در حالت خشک از ۲/۸۹ تا ۳/۷۲ و در حالت تر از ۲/۲۱ تا ۳/۲۲ می‌باشد. بیشترین انحراف معیار بدست آمده مربوط به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و کمترین انحراف معیار مربوط به بُعد جرم-اندازه مدل Rieu و Sposito بود. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش بُعد فرکتالی، پایداری خاکدانه‌ها کاهش و ناپایداری آن‌ها افزایش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های فرکتالی در مقایسه با روش‌های کلاسیک برای ارزیابی ساختمان خاک از دقتی بیشتر برخوردار است.

**کلید واژه‌ها:** بُعد فرکتالی؛ پایداری خاکدانه‌ها؛ مدل‌های فرکتالی؛ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛ میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها

### مقدمه

مناسب از آن، اهمیتی ویژه دارد. یکی از مهمترین این ویژگی‌ها، ساختمان خاک است که خود از شیوه قرار گرفتن ذرات خاک در کنار یکدیگر بدست می‌آید. برای تشکیل ساختمان خاک باید دو شرط تحقق یابد. نخست ذرات منفرد باید به یکدیگر نزدیک شوند. دوم، باید

خاک از مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشور است. رشد روز افزون جمعیت و نیاز انسان به تأمین غذا، اصول و چگونگی بهره‌برداری از خاک را تعیین می‌کند. استفاده نامناسب از خاک، موجب شتاب تخریب آن می‌شود. آگاهی از ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌منظور بهره‌وری

گستره و پیش‌روی ریشه‌ها را بهبود می‌بخشد. بدین ترتیب، دستیابی به وضعیت بهینه ساختمان خاک و ارتقای پایداری واحدهای تشکیل‌دهنده آن، از مهم‌ترین اهداف کشاورزی پایدار و حفاظت محیط‌زیست به‌شمار می‌رود (Bronick and Lal, 2005). ساختمان خاک، در مدیریت خاک با هدف رعایت استانداردهای زیست محیطی و ارتقای توان تولید پایدار منابع، اهمیتی فراوان دارد.

تاکنون شاخص‌هایی چند برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده که بسته به نوع نیروی فرساینده و هدف مطالعه، از یک یا ترکیبی از آنها استفاده می‌شود. به عنوان مثال، برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک در برابر فرسایش بادی، از روش الک خشک استفاده می‌شود. حال آنکه برای ارزیابی فرسایش آبی، روش الک تر به کار گرفته می‌شود (Kemper and Rosenau, 1986). Yoder (۱۹۳۶) روشی برای الک تر پیشنهاد کرد که هم‌اکنون به عنوان روش رایج به کار گرفته می‌شود. VanBavel (۱۹۴۹) شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)<sup>۱</sup> را پیشنهاد کرد. در این روش، وزن‌های برابر از خاکدانه‌ها در ضریبی که متناسب با اندازه آن‌ها است، ضرب می‌شوند. هرچه مقدار MWD بزرگتر باشد، پایداری نسبی خاکدانه‌ها نیز بیشتر است. Mazurak (۱۹۵۰) شاخص میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD)<sup>۲</sup> را ارائه کرد و به این نتیجه رسید که این شاخص به دلیل ماهیت هندسی آن، پایداری خاکدانه‌ها را با دقتی بیشتر از میانگین وزنی بیان می‌کند. این دو شاخص هم‌اکنون به عنوان روش‌های کلاسیک ارزیابی ساختمان خاک به‌کار می‌روند. هر دو روش کلاسیک ذکر شده برای دانه‌های درشت خاک نتایج قابل قبولی ارائه می‌نمایند، لیکن برای خاکدانه‌های بسیار ریز از دقت مناسبی برخوردار نیستند، زیرا دانه‌های بسیار ریز خاک معمولاً به

نیروی وجود داشته باشد که بتواند ذرات نزدیک به هم را نگهداری کند (Bronick and Lal, 2005).

منظور از پایداری ساختمان خاک، توانایی خاک در برابر نیروهای فرساینده و بازسازی آن پس از تخریب می‌باشد (Tongway and Hindley, 2004). پایداری خاکدانه‌ها در ارزیابی خاک اهمیتی فراوان دارد. زیرا اگر خاکدانه‌ها بر اثر جذب آب و یا برخورد با ابزار خاک‌ورز متلاشی نشوند، نشان می‌دهد که آبیاری، بارندگی، زهکشی و عملیات کاشت، داشت و برداشت تأثیری تخریبی بر ساختمان خاک نداشته و خاک از پایداری مطلوبی برخوردار است (بای‌وردی، ۱۳۸۸). با افزایش درصد رس، خاکدانه‌سازی افزایش می‌یابد. مواد آلی نیز هم از راه اتصال ذرات خاک به یکدیگر و هم از راه تغذیه ریزجانداران خاکزی به خاکدانه‌سازی و بهبود ساختمان، کمک می‌کنند. اکسیدهای آهن و آلومینیم نیز هم به تنهایی و هم در ترکیب با مواد آلی موجب پایداری ساختمان خاک می‌شوند. بنابراین، عوامل مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها را می‌توان به دو گروه درونی یا ویژگی‌های ذاتی خاک (مانند غلظت یونها، هدایت الکتریکی، pH، نسبت جذب سدیم، مقدار ماده آلی، آهن، اکسیدهای آهن و آلومینوم، و نوع کانی‌های رس) و عوامل بیرونی (همچون اقلیم، مکان و فصل) تقسیم کرد (Amezketta, 1999).

ساختمان خاک با اثر بر چرخه کربن و دیگر عناصر غذایی، جذب، ذخیره و حرکت آب، تهویه، رسانایی گرمایی خاک و مقاومت مکانیکی، بر رشد گیاه و تولید بهینه آن اثر می‌گذارد. فرسایش خاک به‌گونه‌ای چشمگیر تحت تأثیر پایداری ساختمان و خاکدانه‌های آن است (Kay, 2000). ساختمان خاک اثرات بافت را در رابطه با آب و هوای خاک بهبود می‌بخشد. اندازه بزرگ خاکدانه‌ها باعث پیدایش فضای خالی در بین آنها می‌شود که به مراتب بزرگتر از خلل و فرجی است که در بین ذرات شن، سیلت و رس در درون خاکدانه‌ها بوجود می‌آید. این امر جریان آب و هوا را در خاک به آسانی فراهم ساخته و

1 Mean Weight Diameter

2 Geometric Mean Diameter

هندسه فرکتالی در شاخه‌های دیگر دانش خاکشناسی از جمله مدل‌سازی توزیع خاکدانه‌ها و تأثیر کاربری‌های مختلف بر آن براساس بُعد فرکتالی (Pirmoradian *et al.*, 2005; Paz-Ferrero *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2008) ارزیابی تخریب و کیفیت ساختمان خاک (Wang *et al.*, 2006; Zolfaghari and Hajiabbasi, 2008) پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک (Rieu and Sposito, 1991b; Kravchenko and Zhang, 1998) تخلخل و نفوذپذیری خاک (Perfect, 1999) تعیین سطح ویژه خاک (Sepaskhah and Tafteh, 2011) فرسایش‌پذیری خاک (Hwang *et al.*, 1999) و بافت خاک (Mena *et al.*, 2002) نیز به کار گرفته شده است. Gulser (۲۰۰۶) با بررسی تأثیر کشت علوفه‌های مختلف بر ساختمان خاک و ارتباط آن با بُعد فرکتالی به این نتیجه رسید که میان بُعد فرکتالی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همبستگی منفی وجود دارد که نشان‌دهنده کاهش مقدار بُعد فرکتالی با افزایش اندازه خاکدانه‌ها به علت کشت علوفه می‌باشد. این کاهش منفی توسط محمدیان خراسانی و همکاران (۱۳۹۴) نیز برای خاک‌های آهکی ایران گزارش شده است.

Liu و همکاران (۲۰۰۹) ویژگی‌های فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک متأثر از جامعه گیاهی نواحی جنگلی را با استفاده از مدل Tyler و Wheatcraft مورد ارزیابی قرار داده و دریافتند که رابطه‌ای خطی بین بُعد فرکتالی و درصد رس، شن و تخریل خاک وجود دارد. آنان همچنین نتیجه‌گیری کردند که با تحلیل بُعد فرکتالی بهتر می‌توان تفاوت بین توزیع اندازه ذرات و تخریل خاک را به صورت کمی بیان کرد.

محمدیان خراسانی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از مدل‌های فرکتالی و روش‌های کلاسیک پرداخته و نتیجه‌گیری کردند که بُعد‌های فرکتالی مدل تعداد - اندازه Mandelbrot در سری الک‌های خشک و مدل تعداد - اندازه Rieu و Sposito در سری الک‌های تر با دو شاخص تجربی قطر خاکدانه‌ها

یکدیگر می‌چسبند (محمدیان خراسانی و همکاران، ۱۳۹۴).

نظم و تکرار موجود در بسیاری از پدیده‌های طبیعی همچون شکل ابرها، رشته کوه‌ها، شبکه رودخانه‌ها و گیاهان، بشر را بر آن داشت تا با مطالعه این موارد، روابطی ریاضی میان این الگوهای تکرارشونده بیابد. Mandelbrot (۱۹۸۲)، هنگام اندازه‌گیری طول خط ساحلی انگلستان دریافت که با تغییر مقیاس، طول خط ساحلی بدست آمده تغییر می‌کند. نظریه وی منجر به ایجاد دانشی بنام هندسه فرکتالی<sup>۱</sup> شد. مندلیبرات واژه فرکتال را از واژه لاتین فرکتوس<sup>۲</sup> به معنی سنگی که به شکل نامنظم شکسته و خرد شده باشد، برگزید (Mandelbrot, 1982). اشیای فرکتالی خودهمانند بوده، بُعد آن‌ها عددی غیر صحیح است و در مقیاس‌های ریز بسیار پیچیده می‌باشند. ساختمان خاک نیز همچون برخی از پدیده‌های طبیعی در شرایط گوناگون، از ماهیتی فرکتالی برخوردارند. در نتیجه به منظور بیان ساختمان خاک به صورت یک ویژگی قابل سنجش، همواره به مفهومی کمی برای آن نیاز بوده است. با معرفی مفهوم هندسه فرکتالی به نظر می‌رسد که ابزاری مناسب برای بیان کمی ساختمان خاک در دانش خاکشناسی فراهم شده است.

نخستین بار Rieu و Sposito (۱۹۹۱b) با استفاده از الگوی اسفنج منژر، مدلی ریاضی برای منحنی رطوبتی ارائه کردند. در پژوهشی دیگر آنها (۱۹۹۱a) با استفاده از هندسه فرکتالی، وضعیت تخریل خاک و آب موجود در آن را بررسی کردند. Filgueira و همکاران (۱۹۹۹) حساسیت ویژگی‌های فرکتالی خاکدانه‌ها را در مدیریت‌های مختلف تعیین کردند. در این پژوهش که در آن از هر دو مدل Rieu و Sposito استفاده شده بود، نتیجه‌گیری شد که بُعد فرکتالی جرم-اندازه به مدیریت حساس نیست.

<sup>1</sup> Fractal geometry

<sup>2</sup> Fractus

پایداری خاکدانه‌ها به روش کلاسیک از میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) استفاده شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \log \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right) \quad (2)$$

که در آن‌ها  $\bar{X}$  میانگین قطر خاکدانه‌هایی که بر روی هر یک از الک‌ها باقی می‌ماند،  $W_i$  نسبت خاکدانه‌ها در هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در آغاز آزمایش و  $n$  تعداد الک‌ها می‌باشد.

برای تعیین بُعد فرکتالی خاکدانه‌ها از چهار مدل فرکتالی استفاده شد که خود به دو گروه "جرم - اندازه" و "تعداد - اندازه" خاکدانه‌ها تقسیم می‌شوند. تمام محاسبات برای هر دو حالت خشک و تر انجام شد. بیان ریاضی مدل‌های چهارگانه مورد استفاده به صورت زیر است:

الف- مدل جرم - اندازه (Rieu and Sposito (Dm) (۱۹۹۱a)

شکل عمومی این مدل را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\frac{\rho_i}{\rho_0} = \left(\frac{d_i}{d_0}\right)^{D_m-3} \quad (3)$$

که در آن  $\rho_i$  جرم ویژه ظاهری کلاس اندازه  $i$ ام ( $\text{Mg/m}^3$ )،  $\rho_0$  جرم ویژه ظاهری بزرگترین خاکدانه ( $\text{Mg/m}^3$ )،  $d_i$  میانگین قطر خاکدانه‌های کلاس اندازه  $i$ ام (mm)،  $d_0$  میانگین قطر بزرگترین خاکدانه (mm) و  $D_m$  بُعد فرکتالی جرم می‌باشد.

ب- مدل جرم - اندازه Tyler and Wheatcraft (۱۹۹۲) فرم کلی این مدل بصورت زیر است (Liu et al., 2009):

$$\frac{M(r < R)}{M_t} = \left(\frac{r}{RL}\right)^{3-D_m} \quad (4)$$

بیش‌ترین همبستگی را دارند. در پژوهشی دیگر، کرمی و همکاران (۱۳۹۱) به تخمین پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از هندسه فرکتالی پرداختند و دریافتند که وجود رابطه معکوس بین شاخص‌های پایداری خاکدانه با بُعد فرکتالی مؤید کاهش بُعد فرکتالی با افزایش پایداری خاکدانه می‌باشد. وجود همبستگی‌های قوی بین پارامترهای فرکتالی و ویژگی‌های خاک نشان‌دهنده توانایی مناسب مدل‌های فرکتالی در شبیه‌سازی ویژگی‌های خاک و پارامترهای نفوذ آب به خاک می‌باشد. آنان همچنین بیان کردند که از مدل‌های مزبور می‌توان برای بیان کمی توزیع اندازه خاکدانه‌ها و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده کرد.

بنابراین باتوجه به اهمیت بیان کمی ساختمان خاک برای فرآیندهای حاکم بر حرکت و جابه‌جایی جرم و انرژی در خاک، این پژوهش انجام گردید. هدف از این پژوهش، استخراج بُعد فرکتالی خاکدانه‌ها در حالت‌های خشک و تر و مقایسه نتایج حاصله با روش‌های کلاسیک ارزیابی پایداری ساختمان خاک بود.

## مواد و روش‌ها

تعداد ۳۰ نمونه از خاک سطحی منطقه‌ای زراعی در دشت ورامین برداشت شد. افزون بر نمونه‌های دست‌خورده، نمونه‌های دست‌نخورده نیز تهیه و به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس، جرم ویژه ظاهری و مقدار رطوبت هر یک از نمونه‌ها تعیین شد. آنگاه با استفاده از روش سری الک‌های خشک و سری الک‌های تر و با استفاده از مدل‌های فرکتالی، بُعد فرکتالی خاکدانه‌های نمونه‌ها بدست آمد. برای تعیین توزیع اندازه خاکدانه‌ها، از سری الک‌های خشک با قطرهای ۰/۴۲، ۰/۸۴، ۰/۱۷۰، ۰/۳۰۰، ۰/۶۰۰، ۱/۲۰۰، ۲/۰۰۰، ۴/۰۰۰، ۸/۰۰۰، ۱۶/۰۰۰، ۳۲/۰۰۰ میلی‌متر و برای سری الک‌های تر از قطرهای ۰/۰۷۵، ۰/۱۵۰، ۰/۳۰۰، ۰/۶۰۰، ۱/۲۰۰، ۰/۵۰۰ میلی‌متر استفاده شد.

پایداری خاکدانه‌ها به دو روش کلاسیک و فرکتالی مورد ارزیابی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شدند. برای ارزیابی

آمده در حالت خشک بدست آمد. برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها بر مبنای شاخص‌های کلاسیک نیز نسبت میانگین‌های وزنی و هندسی بدست آمده در سری الک‌های تر به سری الک‌های خشک، محاسبه گردید. برای تعیین درصد ناپایداری خاکدانه‌ها، نسبت اختلاف حالت تر و خشک بر مقدار بدست آمده در حالت خشک بدست آمد. حال آنکه بر مبنای مدل‌های فرکتالی، نسبت اختلاف بُعدهای بدست آمده از سری الک‌های خشک و سری الک‌های تر برای هر نمونه محاسبه گردید. همچنین به منظور مقایسه بُعدهای بدست آمده در حالت تر و خشک، نمودارهای مربوط به حالت‌های تر و خشک رسم و سطح محصور منحنی‌ها در این دو حالت تعیین و مقایسه گردید. سپس به کمک نرم‌افزار SPSS 18، کمیتهای آماری بُعدهای بدست آمده از چهار مدل فرکتالی، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها شامل مقدار خطا و انحراف معیار هر یک از متغیرهای مورد بررسی به منظور آسان شدن مقایسه کارایی مدل‌های فرکتالی نسبت به یکدیگر و نسبت به شاخص‌های کلاسیک، تعیین گردید. سپس با ترسیم نمودار بُعدهای فرکتالی در مقابل شاخص‌های کلاسیک، رابطه موجود میان آنها تعیین و با یکدیگر مقایسه شد.

### نتایج و بحث

کمیتهای آماری متغیرهای مورد بررسی شامل GMD، MWD و هر چهار بُعد فرکتالی مدل‌های تعداد - اندازه و جرم - اندازه Rieu و Sposito، تعداد - اندازه Mandelbrot و جرم - اندازه Tyler و Wheatcraft در جدول ۱ ارائه شده‌اند. بررسی این جدول نشان می‌دهد که بیشترین انحراف معیار مربوط به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و کمترین انحراف معیار مربوط به بُعد جرم - اندازه Rieu و Sposito می‌باشد. محاسبات صورت گرفته نشان داد که دامنه تغییرات بُعد فرکتالی جرم - اندازه Rieu و Sposito در حالت خشک از ۲/۸۶ تا ۲/۹۲ و در حالت تر از ۲/۹۰ تا ۲/۹۹ بوده است. ضریب تبیین در این مدل از

که در آن  $D_m$  بُعد فرکتال جرمی،  $M$  جرم جمعی خاکدانه‌ها بر روی الک با اندازه‌های کوچکتر از  $R$  (g)،  $M_r$  جرم خاکدانه‌ها (g)،  $RL$  بالاترین اندازه منفذ الک (mm) و  $r$  میانگین قطر خاکدانه‌ها در هر کلاس (mm) می‌باشد.

### پ- مدل تعداد - اندازه Mandelbrot (۱۹۸۲)

این مدل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$N(r > R) = kr^{-D} \quad (5)$$

که در آن  $r$  اندازه قطر نرمال شده خاکدانه‌ها در هر بخش اندازه‌ای (میانگین اندازه مش الک (mm) با اندازه مش الک بزرگتر از آن)  $N(r > R)$ ، تعداد جمعی خاکدانه‌های با اندازه  $r$  که از مقیاس اندازه‌ای  $R$  بزرگتر است و با قطر الک تعیین می‌شود،  $K$  مقدار ثابت و  $D$  بُعد فرکتالی که به شکل و مقدار پراکندگی ذرات بستگی دارد.

### ت- مدل تعداد - اندازه Rieu and Sposito (Df) (۱۹۹۱b)

بیان ریاضی این مدل به صورت زیر است:

$$\sum \frac{M(d_i)}{(d_i^3 \rho_i)} = Ad_k^{-D_f} \quad (6)$$

که در آن  $d_k$  میانگین قطر خاکدانه‌ها برای کلاس  $k$  ام (mm)،  $A$  ثابت مدل،  $d_i$  میانگین قطر خاکدانه‌ها (m)،  $M(d_i)$  جرم خاکدانه‌ها (kg) و  $\rho_i$  جرم ویژه ظاهری خاکدانه‌ها می‌باشد.

پس از محاسبه بُعدهای فرکتالی، با محاسبه اختلاف بُعدهای بدست آمده برای خاکدانه‌های خشک و تر، درصد پایداری و ناپایداری خاکدانه‌ها، نمونه‌ها بر پایه شاخص‌های کلاسیک GMD و MWD و مدل‌های فرکتالی تعداد - اندازه و جرم - اندازه Rieu و Sposito، تعداد - اندازه Mandelbrot و جرم - اندازه Tyler و Wheatcraft، از پایدارترین تا ناپایدارترین رتبه‌بندی شدند. برای تعیین درصد پایداری خاکدانه‌ها بر مبنای مدل‌های فرکتالی، نسبت بُعدهای بدست آمده در حالت تر به بُعدهای بدست

۰/۹۶ تا ۰/۹۹ بود. در پژوهشی Eghball و همکاران (۱۹۹۳) در شرایط مشابه پژوهش حاضر، دامنه بُعد فرکتالی تعداد - اندازه مدل Rieu و Sposito را ۲/۸۱ تا ۳/۳۰ تعیین کردند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. بُعد فرکتالی تعداد - اندازه Mandelbrot نیز در حالت خشک از ۲/۸۹ تا ۳/۷۲ و در حالت تر از ۲/۲۱ تا ۳/۲۲ متغیر بود. ضریب تبیین در این مدل نیز بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۹ بدست آمد. از آنجا که مدل تعداد - اندازه Mandelbrot دارای ضریب تبیین بیشتری بود به عنوان بهترین مدل برگزیده شد. مقایسه بُعدهای فرکتالی سه مدل Tyler و Wheatcraft (۱۹۹۲)، تعداد - اندازه Rieu و Sposito و تعداد - اندازه Mandelbrot در حالت خشک و مرطوب نشان می دهد که بُعدهای بدست آمده در حالت مرطوب کمتر از حالت خشک می باشند. این موضوع بیانگر آن است که خاکدانه‌ها بر اثر حرکت در آب ریزتر می شوند.

تغییرات مربوط به اختلاف بُعدهای فرکتالی نمونه‌ها بر پایه هر چهار مدل فرکتالی در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، بر مبنای مدل تعداد - اندازه Mandelbrot، پایدارترین ساختمان مربوط به نمونه بیست و چهارم و ناپایدارترین آن‌ها نمونه نهم می باشد.

۰/۶۴ تا ۰/۹۸ متغیر بود. دامنه بُعد جرمی بدست آمده در این پژوهش تقریباً با نتایج پژوهش Crawford و Young (۱۹۹۱) که دامنه بُعد جرم - اندازه را در خاک‌هایی با بافت لومی شنی ۲/۷۵ تا ۲/۹۳ تعیین کردند، همخوانی دارد. دامنه تغییرات بُعد فرکتالی جرم - اندازه برای مدل Tyler و Wheatcraft (۱۹۹۲) در حالت خشک از ۲/۵۳ تا ۲/۷۸ و در حالت تر از ۲/۲۴ تا ۲/۵۵ بود. ضریب تبیین در این مدل از ۰/۶۳ تا ۰/۹۹ متغیر بود و همانطور که از دامنه بُعد ذکر شده برای این دو مدل مشخص است در هیچ یک از نمونه‌ها بُعد فرکتالی بیشتر از ۳ مشاهده نگردید. بنابراین می توان نتیجه گرفت که این دو مدل به خوبی قادر به بیان توزیع فرکتالی خاکدانه‌ها می باشند. این یافته‌ها با پژوهش‌های Anderson و همکاران (۱۹۹۸) و Perfect و همکاران (۱۹۹۳) که بیان کردند بُعد بیشتر از ۳ از نظر نظری بی مفهوم بوده و ممکن است ناشی از خرد نشدن کامل خاکدانه‌ها و یا خطای برآورد باشد و باید با مدل‌های چندفرکتالی بررسی گردند، همخوانی دارد. دامنه بُعد فرکتالی در مدل تعداد - اندازه Rieu و Sposito از ۲/۷۷ تا ۳/۵۹ در حالت خشک و از ۲/۳۵ تا ۳/۱۸ در حالت تر متغیر بود. همچنین تغییرات ضریب تبیین در این مدل بین

جدول ۱. کمیتهای آماری متغیرهای مورد بررسی

| متغیر                                  | نوع آزمایش | میانگین | انحراف معیار | خطای استاندارد |
|--|------------|---------|--------------|----------------|
| MWD                                    | الک خشک    | ۴/۹۷۴   | ۱/۲۵۹        | ۰/۲۳۰          |
|  | الک تر     | ۰/۶۸۱   | ۰/۴۶۲        | ۰/۰۸۴          |
| GMD                                    | الک خشک    | ۱/۴۰۸   | ۰/۳۸۰        | ۰/۰۹۶          |
|  | الک تر     | ۰/۶۷۶   | ۰/۴۳۳        | ۰/۰۷۹          |
| بُعد مدل Wheatcraft و Teyler           | الک خشک    | ۲/۶۶۵   | ۰/۰۷۴        | ۰/۰۱۴          |
|  | الک تر     | ۲/۴۰۷   | ۰/۰۸۶        | ۰/۰۱۶          |
| بُعد مدل تعداد - اندازه Rieu و Sposito | الک خشک    | ۳/۰۴۴   | ۰/۱۶۶        | ۰/۰۳۰          |
|  | الک تر     | ۲/۸۲۷   | ۰/۱۷۶        | ۰/۰۳۲          |
| بُعد مدل جرم - اندازه Rieu و Sposito   | الک خشک    | ۲/۸۹۲   | ۰/۰۱۵        | ۰/۰۰۳          |
|  | الک تر     | ۲/۹۵۸   | ۰/۰۲۴        | ۰/۰۰۴          |
| بُعد مدل Mandelbrot                    | الک خشک    | ۳/۱۵۲   | ۰/۱۸۹        | ۰/۰۳۱          |
|  | الک تر     | ۲/۸۴۲   | ۰/۱۹۵        | ۰/۰۳۶          |

از نظر ساختمان، نمونه پنجم و ناپایدارترین آن‌ها نمونه بیستم می‌باشد. همچنین با توجه به مقدار اختلاف بدست آمده بر مبنای مدل جرم - اندازه Riu و Sposito در شکل ۱، پایدارترین نمونه مربوط به نمونه بیستم و ناپایدارترین آن‌ها نمونه بیست و نهم بود. نظر به اینکه جرم ویژه ظاهری در این مدل نیز بصورت یک پارامتر ورودی لحاظ شده است، انتظار می‌رود که تغییر در جرم ویژه ظاهری خاک سبب تغییر بُعد فرکتالی شود. بدین مفهوم که همانند مدل تعداد - اندازه Riu و Sposito با افزایش جرم ویژه ظاهری، بُعد فرکتالی نیز افزایش و پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. هرچه پایداری خاکدانه‌ها بیشتر کاهش یابد، اختلاف بُعدهای فرکتالی در حالت خشک و تر افزایش یافته و بنابراین خاک از ساختمان خوبی برخوردار نخواهد بود. Lal و Bronick (۲۰۰۵) در پژوهشی مشابه با آنچه در این پژوهش بدست آمده بیان کرده‌اند که از پایداری خاکدانه‌ها به عنوان شاخصی برای ارزیابی کیفیت ساختمان خاک استفاده شود. بدین ترتیب که هرچه خاکدانه‌ها پایدارتر باشند، کیفیت ساختمان خاک بهتر است. همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، به علت وجود کمیت "3-D" در توان مدل، بُعدهای بدست آمده در هر دو حالت تر و خشک کمتر از ۳ بوده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از نظر هندسی و فیزیکی قابل قبول می‌باشد. به همین علت، همان‌گونه که در شکل ۱ هم آشکار است، مقادیر اختلاف بُعدهای فرکتالی در دو حالت تر و خشک بدست آمده برای تمام نمونه‌ها در این مدل از سایر مدل‌ها کمتر شده است. بنابراین با مقایسه ترتیب بدست آمده برای هر نمونه با روش‌های مورد بررسی در شکل ۱، می‌توان دریافت که دو مدل تعداد - اندازه Mandelbrot و تعداد - اندازه Riu و Sposito در تعیین ترتیب نمونه‌ها تقریباً نتایج یکسانی ارائه نموده‌اند. لیکن به طور کلی ترتیب پایداری تعیین شده بر پایه هر پارامتر متفاوت بود. با انجام تحلیل حساسیت نیز ترتیب تعیین شده برای نمونه‌ها براساس دومین الک از سری الک‌ها بر پایه هر پارامتر

همان‌گونه که از رابطه بدست آمده برای این مدل مشخص است، بُعد فرکتالی بر پایه قطر خاکدانه‌های هر الک در برابر تعداد تجمعی خاکدانه‌های همان الک تعیین می‌شود. بنابراین بُعد بدست آمده در حالت خشک و تر برای نمونه بیست و چهارم اختلاف کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است و به دنبال آن تعداد تجمعی خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است. این یافته نشان‌دهنده مقاومت بیشتر خاکدانه‌های این نمونه در برابر متلاشی شدن در اثر فرو بردن در آب در حالت تر است. بنابراین می‌توان گفت هرچه اختلاف بُعد بدست آمده در این مدل کمتر باشد، تعداد تجمعی خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک بیشتر و نمونه پایدارتر است. این یافته با نتایج ارائه شده توسط Marquez و همکاران (۲۰۰۴) هم‌خوانی دارد. این پژوهشگران گزارش کرده‌اند که برای طبقه‌بندی خاکدانه‌ها از نظر پایداری، از معیارهایی نظیر اندازه خاکدانه‌ها و مقاومت آن‌ها در برابر فرو رفتن در آب استفاده شود و هرچه مقاومت بیشتر باشد، تعداد خاکدانه‌های خرد نشده بیشتر و بنابراین نمونه پایدارتر خواهد بود.

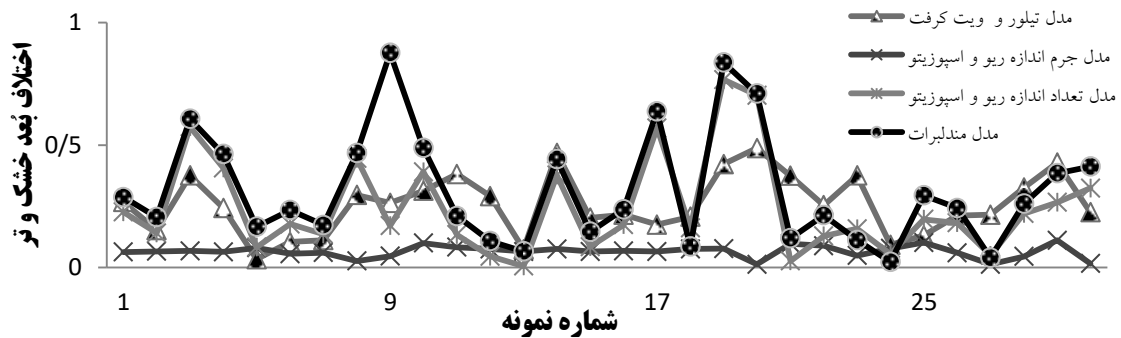
بر پایه مدل تعداد - اندازه Riu و Sposito، بیشترین اختلاف مربوط به نمونه نوزدهم و کمترین اختلاف مربوط به نمونه سیزدهم بود (شکل ۱). بنابراین براساس این مدل، نمونه سیزدهم از پایدارترین خاکدانه‌ها برخوردار بوده است. با توجه به اینکه جرم ویژه ظاهری خاکدانه‌ها به عنوان یک پارامتر ورودی در این مدل وجود دارد، با بررسی بُعدهای بدست آمده برای همه ۳۰ نمونه مورد بررسی، مشخص گردید که با افزایش جرم ویژه ظاهری، بُعد فرکتالی افزایش و از پایداری خاکدانه‌ها کاسته می‌شود. این مطلب با نتایج گزارش شده توسط Martinez-Mena و همکاران (۱۹۹۹) که به وجود رابطه مستقیم بین بُعد فرکتالی و جرم ویژه ظاهری پرداخته‌اند، همخوانی دارد.

بر مبنای مدل تعداد - اندازه Tyler و Wheatcraft نیز همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، پایدارترین نمونه

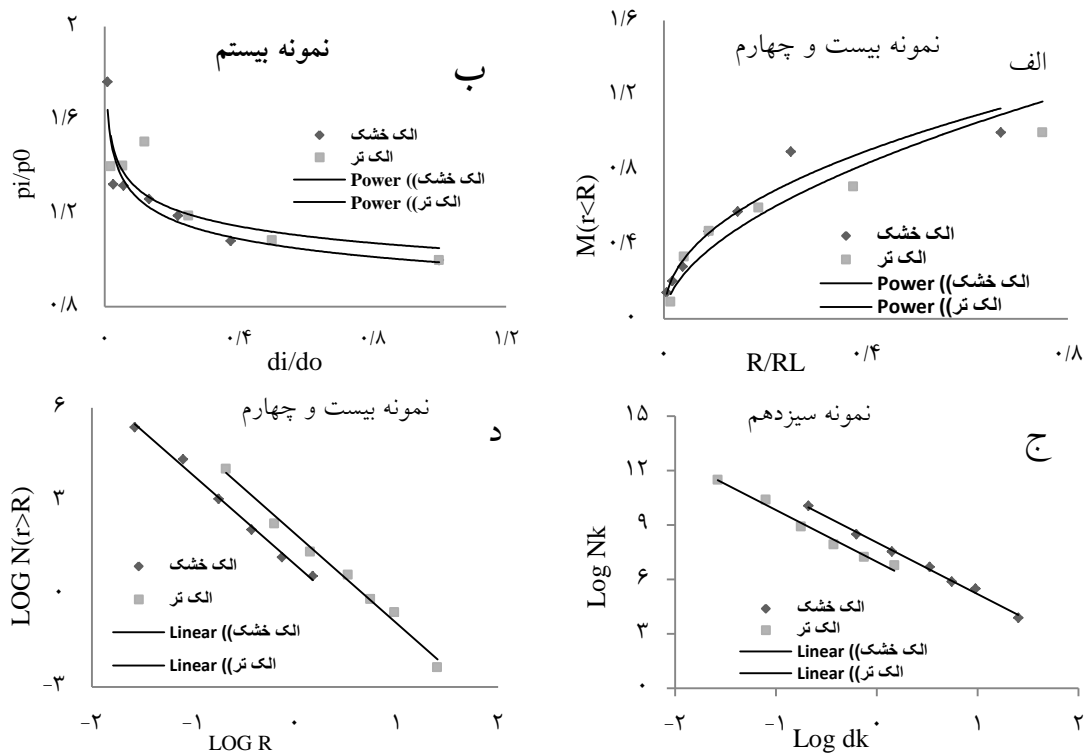
مقایسه پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از سطح زیر منحنی

متفاوت بود. این موضوع نشان می‌دهد که حساس‌ترین عامل بین پارامترهای موجود در یک مدل فرکتالی، بُعد فرکتالی آن است.

همانطور که گفته شد مقایسه پایداری نمونه‌ها از طریق مقایسه اختلاف سطح زیر منحنی بُعد در حالت خشک و تر نیز محاسبه گردید. شکل ۲ پایدارترین نمونه‌ها براساس چهار مدل و شکل ۳ ناپایدارترین نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

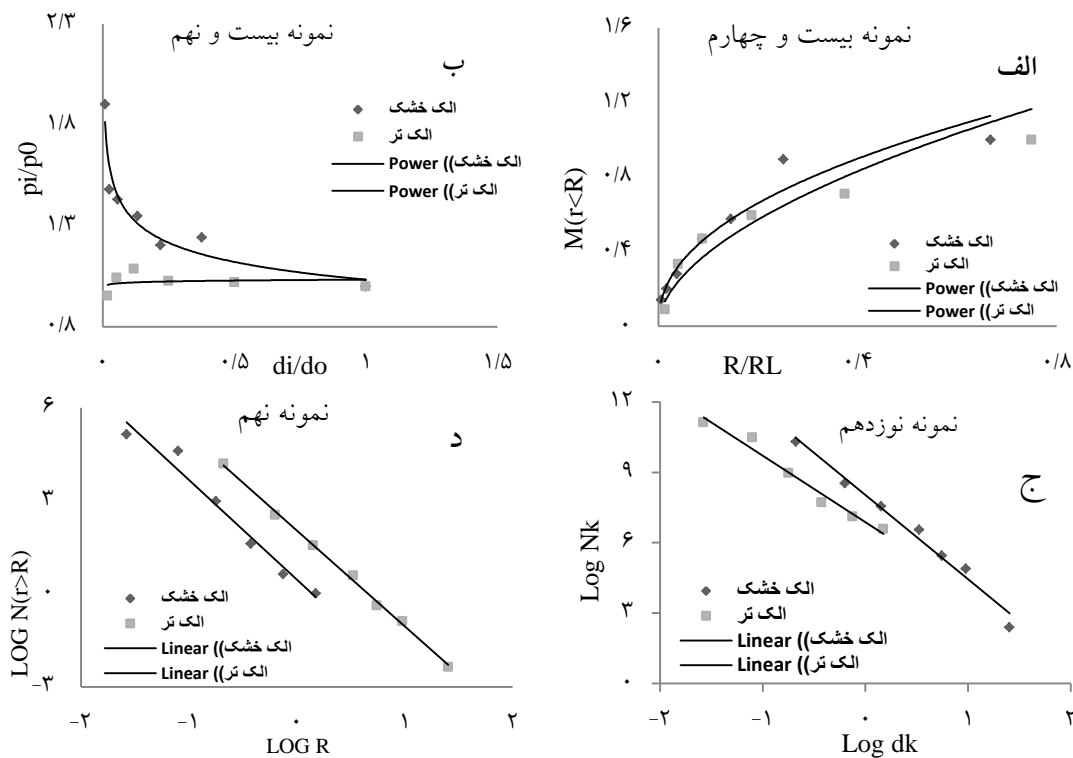


شکل ۱. مقایسه مدل‌های مورد بررسی در تعیین پایداری نمونه‌های مختلف



شکل ۲. پایدارترین نمونه براساس، الف) مدل تیلر و ویت گرفت، ب) مدل جرم-اندازه ریو و اسوزیتو، ج) مدل تعداد-اندازه ریو و اسوزیتو و د) مدل مندلیبرات





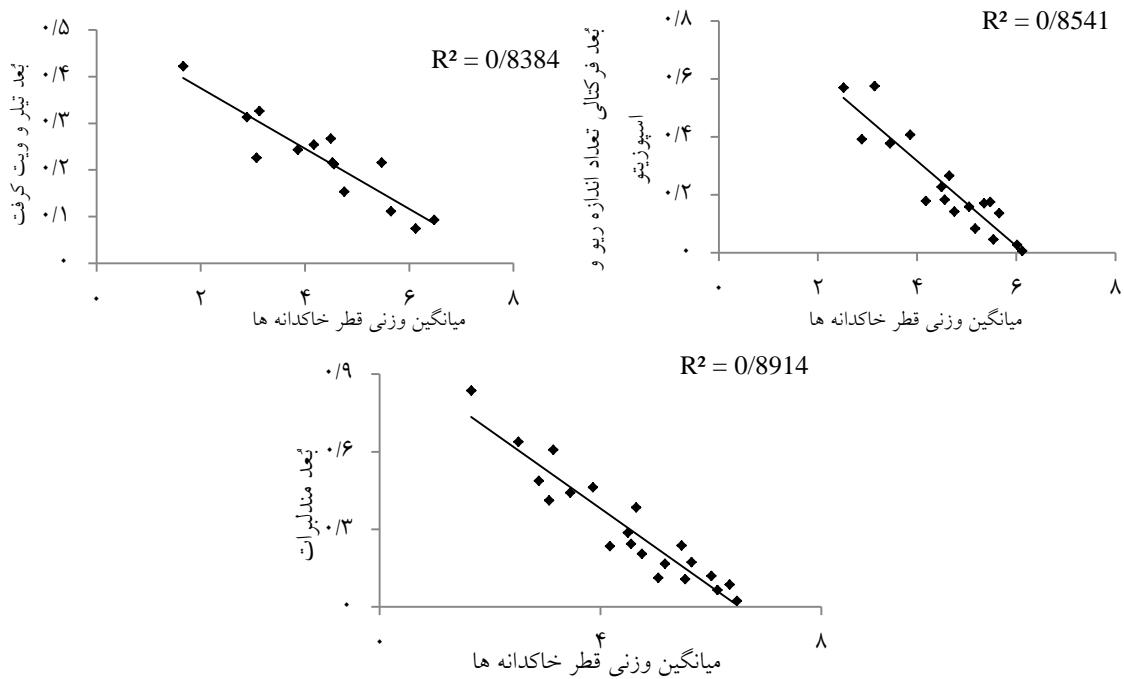
شکل ۳. ناپایدارترین نمونه براساس، الف) مدل تیلر و ویت گرفت، ب) مدل جرم-اندازه ریو و اسوزیتو، ج) مدل تعداد-اندازه ریو و اسوزیتو و د) مدل مندلیبرات

#### مقایسه بُعد فرکتالی با روش کلاسیک

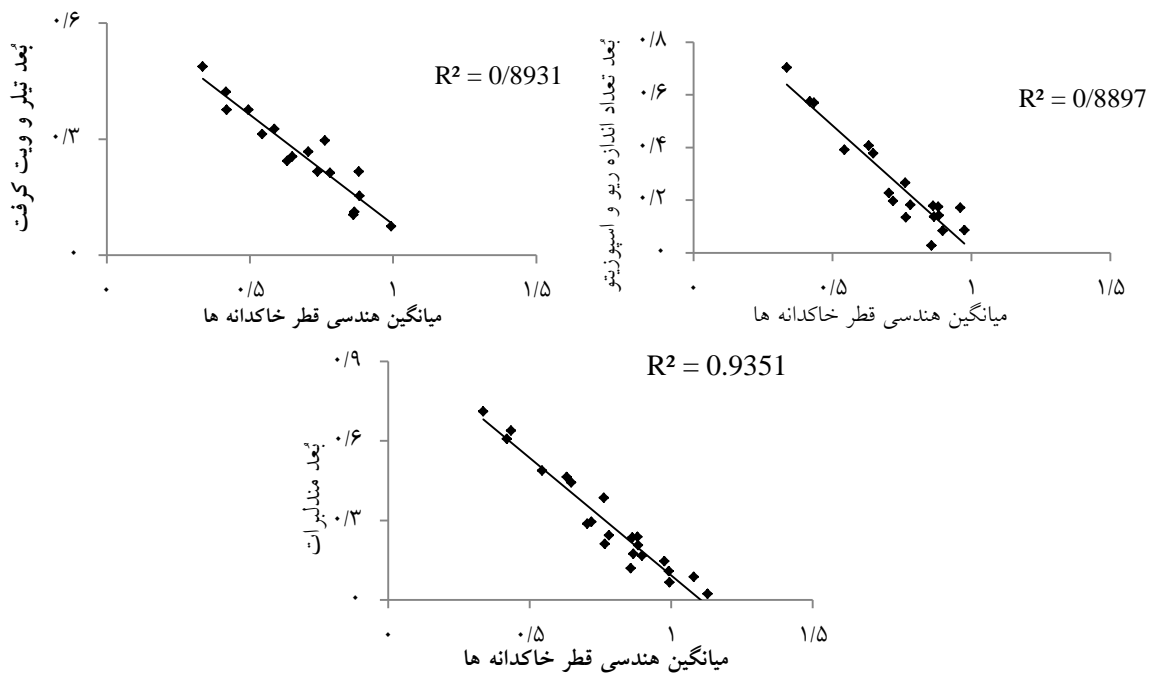
شکل ۴ همبستگی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با مدل‌های مورد بررسی و شکل ۵ میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها با مدل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. براساس شکل‌های ۴ و ۵ بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و بُعد فرکتالی رابطه‌ای معکوس وجود دارد که نمایانگر کاهش بُعد فرکتالی با افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد. هرچه میانگین قطر خاکدانه‌ها بیشتر باشد، به علت افزایش مقاومت در برابر فروپاشی، پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد.

بنابراین بر پایه آنچه که در شکل ۴ و ۵ ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اختلاف بُعد فرکتالی در حالت‌های خشک و تر، پایداری خاکدانه‌ها کاهش و درصد ناپایداری آن‌ها افزایش می‌یابد که با نتایج پژوهش‌های کرمی و همکاران (۱۳۹۱)، Filgueira و همکاران (۲۰۰۶) و Pirmoradian و همکاران (۲۰۰۵) هم‌خوانی دارد.

باتوجه به شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اختلاف سطح دو نمودار در حالت‌های خشک و تر، پایداری خاک کمتر بوده و هرچه این دو نمودار به یکدیگر نزدیک‌تر شوند، بیانگر آن است که غوطه‌ور شدن خاکدانه‌ها در آب باعث متلاشی شدن خاکدانه‌ها نشده و بنابراین نمونه‌ها از پایداری نسبی خوبی برخوردارند. این یافته با نتایج پژوهش Robertson و همکاران (۱۹۸۴) که به مقایسه روش‌های سری الک‌های خشک و تر در تعیین توزیع اندازه ذرات خاک پرداختند، هم‌خوانی دارد. این پژوهشگران گزارش کرده‌اند که خاکدانه‌ها در آزمایش سری الک‌های تر به علت نفوذ آب به داخل آن‌ها خردتر از حالت خشک بوده و هرچه این خردشدگی در دو حالت تر و خشک نزدیک به یکدیگر باشند، نمونه‌ها پایدارترند.



شکل ۴. رابطه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و بُعد فرکتالی مدل‌های مورد بررسی



شکل ۵. رابطه میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) و بُعد فرکتالی مدل‌های مورد بررسی

خاک مورد ارزیابی قرار گرفته و برخلاف روش‌های کلاسیک که مقادیر داده‌ها را نسبت به یک شاخص مرکزی مانند میانگین می‌سنجند، مدل‌های فرکتالی داده‌ها را در مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند. میانگین

استفاده از مدل‌های فرکتالی در ارزیابی ساختمان خاک، مناسب‌تر و دقیق‌تر از روش‌های سنتی می‌باشد، زیرا در مدل‌های فرکتالی پارامترهای مورد بررسی بیشتر است. بنابراین تأثیر ویژگی‌های متفاوت‌تری بر روی ساختمان

وزنی قطر اندازه خاکدانه‌ها، میانگین قطر ذرات را براساس جرم‌های باقیمانده بر روی هر الک محاسبه می‌کند. اگرچه این می‌تواند شاخصی برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها باشد، لیکن عموماً باعث بیش برآوردی در محاسبه میانگین قطر خاکدانه‌ها می‌شود. هرچند که در شاخص میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها این خطا وجود ندارد، لیکن میانگین هندسی به علت داشتن توزیع لگاریتمی، احتمال شکست خاکدانه‌ها در تمامی اندازه‌ها را یکسان فرض می‌کند. بدیهی است که در خاک اینگونه نبوده و خاکدانه‌های بزرگ بیشتر از خاکدانه‌های ریز، خرد می‌شوند که با نتایج پژوهش Rasiah و همکاران (۱۹۹۳) همخوانی دارد. بنابراین بُعد فرکتالی که می‌تواند در مقیاس‌های مختلف خاکدانه‌ها را مورد ارزیابی قرار دهد، برای بررسی کمی ساختمان خاک کارآمدتر است. همچنین تفاوت در ترتیب تعیین شده برای پایداری خاکدانه‌ها براساس هر مدل به علت تنوع بالای مدل‌های فرکتالی و یکسان نبودن عوامل مورد بررسی در مدل‌ها می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت خاک و نیاز روز افزون به تولید غذای بیشتر، یافتن روش‌های نوین، کم هزینه، با دقت و صحت بالا برای ارزیابی و حفاظت خاک بسیار ضروری است. همان‌طور که در کل پژوهش مشخص گردید یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی کیفیت خاک، ساختمان خاک است. بدین منظور ارزیابی پایداری خاک‌های هر منطقه، به ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب خواهد انجامید. در این پژوهش نیز به ارزیابی پایداری ساختمان خاک با استفاده از چهار مدل فرکتالی پرداخته شد که از بین آن‌ها مدل مندلبرات دارای ضریب تبیین بیشتری بود و به‌عنوان

بهترین مدل برگزیده شد. از نظر مقدار بُعد بدست آمده نیز مدل تعداد-اندازه Riuie و Sposito که در هر دو حالت تر و خشک کمتر از ۳ تعیین شده، برای تمام نمونه‌ها از سایر مدل‌ها کمتر بوده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از نظر هندسی و فیزیکی این مدل برای ارزیابی‌های فرکتالی قابل قبول می‌باشد. مدل‌هایی که بُعد برخی نمونه‌ها در آن‌ها بیش‌تر از ۳ بدست آمده برای بررسی مناسب نبوده و برای ارزیابی کمی ساختمان آن نمونه‌ها به مدل‌های چندفرکتالی نیاز می‌باشد. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که با افزایش اختلاف بُعد خشک و تر، پایداری خاکدانه‌ها کاهش و درصد ناپایداری آن‌ها افزایش می‌یابد. پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک، به ذرات ریز خاک وابسته بوده و با افزایش اندازه ذرات، پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین به‌عنوان نتیجه کلی این پژوهش می‌توان گفت از آنجا که مطالعه ساختمان خاک نقشی مهم در مدیریت بهینه و بهره‌وری آب و خاک دارد و همچنین به علت بالا بودن هزینه‌های آزمایشگاهی سنجش ساختمان خاک و مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم آن، استفاده از مدل‌های فرکتالی به دلیل تنوع و دقت زیاد، می‌تواند جایگزینی مناسب برای ارزیابی کلاسیک ساختمان خاک باشد. سرانجام به علت جدید بودن این روش در بررسی ساختمان خاک در ایران، پیشنهاد می‌گردد مدل‌های فرکتالی بیشتری برای این منظور مورد بررسی قرار گیرند. همچنین در مناطق مختلف که دارای خاک‌های متنوع با ساختمان‌های گوناگون هستند پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک با مدل‌های فرکتالی مورد ارزیابی کمی قرار گیرند.

### منابع مورد استفاده

بای‌بوردی، م. ۱۳۸۸. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ نهم. ۶۷۶ صفحه.

- کریمی، ع.، همایی، م.، بای‌بوردی، م. و محمودیان شوشتری، م. ۱۳۹۱. کمی‌سازی پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از مقیاس‌سازی. پژوهش آب ایران. ۶(۱۱): ۷۳-۶۵.
- 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): ۵۱-۳۹.
- Amezqueta, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *Sustain. Agric.* 14: 83-151.
- Anderson, A.N., McBratney, A.B. and Crawford, J.W. 1998. Applications of fractals to soil studies. *Advances in Agronomy.* 63: 2-76.
- Bronick, C.J. and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 124: 3-22.
- Eghball, B.L.N., Mielke, G., Calvo, A., and Wilhelm, W.W. 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods and crop sequences. *Soil Science Society of America Journal.* 57: 1337-1341.
- Filgueira, R.R., Fournier, L.L., Crisola, C.I., Gelati, P. and Garcia, M.G. 2006. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation. *Geoderma.* 134: 327-334.
- Filgueira, R.R., Fournier, L.L., Sarli, G.O., Aagon, A. and Rawals, W.J. 1999. Sensivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a Phaeozem in central Argentina. *Soil and Tillage Research.* 52: 217-222.
- Gulser, C. 2006. Effect of forage cropping treatments on soil structure relationships with fractal dimensions. *Geoderma.* 131: 33-44.
- Hwang, S.I., Lee, K.P., Lee, D.S. and Powers, SE. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal.* 66:1143-1150.
- Kay, B.D. 2000. Soil Structure, in: *Handbook of Soil Science.* CRC Press, E. M. Sumner, Ed., USA: F.I. Boca Raton. 229-264.
- Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution, in: *Methods of Soil Analysis. Part1. Physical and Mineralogical Methods,* Klute. A., Ed. 425-442.
- Kravchenko, A. and Zhang. R. 1998. Estimating the soil water retention from particle size distribution: a fractal approach. *Soil Science Society of America Journal.* 163: 171-179.
- Liu, X., Zhang, G., Heathman, G.C., Wang, Y. and Huang, C.H. 2009. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China. *Geoderma* 154: 123-130.
- Mandelbrot, B.B. 1982. *The fractal geometry of nature.* W.H. Freeman and Company. New York. 468 p.
- Marquez, C.O., Garcia, V.J., Cambardella, C.A., Schultz, R.C. and Isenhardt, T.M. 2004. Aggregate size stability distribution and soil stability. *Soil Science Society of America Journal.* 68: 725-735.
- Martinez-Mena, M., Deeks, L. and Williams, A. 1999. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility. *Geoderma.* 90: 87-98.
- Mazurak, A.P. 1950. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. *Soil science society of america journal.* 69: 135-148.
- Mena, M., Deeks, L.K. and Williams, AG. 1999. An evaluation of a fragmentation dimension technique to determine soil erodibility. *Geoderma.* 90:87-98.
- Paz-Ferrero, J., Vidal-Vazquez, E. and Miranda. G.V. J. 2010. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters. *Geoderma.* 160: 47-56.
- Perfect, E. 1999. Estimating soil mass fractal dimension from water retention curves. *Geoderma* 88: 221-231.
- Perfect, E., Kay, B.D., and Rasiyah, V. 1993. Multifractal model for soil aggregate fragmentation. *Soil Science Society of America Journal.* 57: 896-900.
- Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R. and Hajabbasi, M.A. 2005. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystems Engin.* 90(2): 227-234.
- Rasiyah, V., Kay, B. and Perfect, E. 1993. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal.* 57: 891-895.
- Rieu, M., and Sposito, G. 1991a. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal.* 55(5): 1231-1238.
- Rieu, M. and Sposito, G. 1991b. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II. Applications. *Soil Science Society of America Journal.* 55:1239-1244.
- Robertson, J., Thomas, C.J., Caddy, B., and Lewis, A.J.M. 1984. Particle size analysis of soils — A comparison of dry and wet sieving techniques. *Forensic Science International.* 24: 209-217.

- Sepaskhah, A. R. and Tafteh, A. 2011. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 1-11.
- Tongway, D.J. and Hindley, N.L. 2004. *Landscape Function Analysis: procedures for monitoring and assessing landscapes with special reference to mine sites and rangelands, Version 3.1*. Canberra Australia: CSIRO Sustainable Ecosystems.
- VanBavel, C.H.M. 1949. Mean weight-diameter of soil aggregation as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal*. 14: 20-23.
- Wang, D., Fu, B., Fhao, W., Hu, H. and Wang, Y. 2008. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China. *Catena*. 72: 29-36.
- Wang, X., Li, M.H., Liu, S. and Liu, G. 2006. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China. *Geoderma*. 134: 56-61.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *Journal of the American society of Agron*. 28: 337-351.
- Young, I.M., and Crawford, J.W. 1991. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *Journal of Soil Science*. 42: 187-192.
- Zolfaghari, A.A. and Hajabbasi. M.A. 2008. Effect of different land use treatments on soil structural quality and relations with fractal dimensions. *Soil Science Society of America Journal*. 3: 101-108.



ISSN 2251-7480

## Using fractal models for quantifying soil structure and comparison with classical methods

Sepide Mofidi<sup>1\*</sup>, Mahnaz Eskandari<sup>2</sup>, Ebrahim Pazira<sup>3</sup> and Mehdi Homae<sup>4</sup>

1\*) M.Sc. Student Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\* Corresponding author email: [sepide\\_mofidi@yahoo.com](mailto:sepide_mofidi@yahoo.com)

2) Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, Karaj, Iran

3) Professor Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran,

4) Professor Department of Irrigation and Drainage, Tarbiat modares University, Tehran, Iran

Received: 02-10-2017

Accepted: 09-12-2017

### Abstract

Soil structure is of great importance from both crop production and water resources management point of views. Since soil structure is often expressed qualitatively, the so-called fractal geometry, as a novel method, can be used to describe the soil structure in a quantitative manner. Using fractal concept and its comparison with the classical aggregate stability methods can assist to better understanding of soil structure. This research was aimed to quantitatively assess the soil aggregate stability by using some fractal and classical models. To attain this purpose, a number 30 soil samples were collected from topsoil of an agricultural area. Then, the mean weight diameter MWD and geometric mean diameter GMD of soil samples were determined by using wet and dry sieving method. The fractal dimensions of soil samples were determined for four fractal models including the number-size and mass-size of Rieu and Sposito, number-size of Mandelbrot, and mass-size of Tyler and Wheatcraft. Results indicated that the range of fractal dimensions for mass-size model of Rieu and Sposito in dry condition varies from 2.86 to 2.92 and in wet condition from 2.90 to 2.99., this range for Tyler and Wheatcraft model was 2.52 to 2.78 and 2.24 to 2.55, for dry and wet conditions, respectively. Results further showed that for the number-size model of Rieu and Sposito the fractal dimension varied from 2.77 to 3.59 in the dry and from 2.35 to 3.18 in wet conditions. These ranges for Mandelbrot model were obtained to be 2.89 to 3.72 and 2.21 to 3.22 for the dry and wet sieves, respectively. The largest standard deviation was obtained for MWD, while the lowest belonged to the mass-size model of Rieu and Sposito. The obtained results further indicated that by increasing the fractal dimension, aggregate stability decreases and aggregate instability tend to increase. It can be then concluded that by using fractal dimensions one can more precisely describe the aggregate stability compares to the classical methods.

**Keywords:** aggregates stability; fractal dimension; fractal models; GMD; MWD