

کاربرد تئوری فرکتالی در کمی‌سازی ساختمان برخی از راسته‌های خاک در استان فارس

علی‌داد کرمی^{۱*} - روح اله زارع^۲ - وحیداله جهاندیده مهجن آبادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲

چکیده

ساختمان خاک و پایداری آن با بسیاری از فرآیندهای کشاورزی و زیست‌محیطی در ارتباط است. از این رو توصیف و کمی‌سازی ساختمان خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ولی ساختمان خاک بصورت کیفی (مکعبی، دانه‌ای و ...) بیان می‌شود. هدف از این تحقیق تعیین پایداری خاکدانه‌ها و استفاده از هندسه فرکتالی و تعیین بُعد فرکتالی ساختمان خاک در برخیز راسته‌های خاک بود که نتیجه در مدل‌های کاربردی برای بیان فرآیندهای خاک و مدل‌سازی قابل استفاده خواهد بود. بنابراین از افق‌های مشخصه هفت راسته خاک شامل انتی‌سول، ورتی‌سول، اریدی‌سول، مالی‌سول، الفی‌سول، هیستوسول و اینسپتی‌سول در استان فارس نمونه‌برداری خاک (۲۷ نمونه) انجام گردید. ویژگی‌های خاک شامل توزیع اندازه خاکدانه‌ها، بافت، درصد رطوبت اشباع، کربن آلی، EC، pH، گچ و آهک اندازه‌گیری و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) و بُعد فرکتالی خاکدانه‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین بُعد فرکتالی مدل‌های ریو و اسپوزیتو (DnR) و تیلر و ویت‌کرافت (DmT) با MWD و GMD با ویژگی‌های خاک وجود داشت. این همبستگی بین پارامترهای فرکتالی با ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری، درصد رس و درصد شن، قوی‌تر از دیگر ویژگی‌های خاک بود. همبستگی منفی و معنی‌داری (در سطح یک درصد) بین DmT و DnR با MWD و GMD وجود داشت. به طوری که راسته‌های خاکی که عدد بُعد فرکتالی کمتری داشتند، MWD و GMD بزرگتری داشتند. ضریب تبیین، میانگین خطاها، ریشه میانگین مربعات خطاها، مجذور مربعات باقی‌مانده‌ها، مجذور مربعات عدم برازش و آماره آکایک مطلوبیت بیشتر مدل تیلر و ویت‌کرافت را نشان داد. مدل ریو و اسپوزیتو نیز مدل مناسبی بود گرچه در مواردی بُعد فرکتالی را زیاد محاسبه کرد که دلیل آن احتمالاً حساسیت زیاد این مدل می‌باشد. به طور کلی بُعد فرکتالی از اهمیت ویژه‌ای برای مطالعه و کمی‌سازی ساختمان خاک برخوردار است و مقدار آن به استثناء راسته هیستوسول در دیگر راسته‌ها در محدوده مناسب (۳) بود.

واژه‌های کلیدی: بُعد فرکتالی، پایداری خاکدانه‌ها، توزیع اندازه خاکدانه‌ها، راسته خاک، ساختمان خاک

مقدمه

راسته‌های خاک به لحاظ ماهیت در مکان‌های متفاوتی قرار داشتند که مدیریت بهره‌برداری از منابع خاک در آنها اختلافاتی را داشت. حفظ پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک بر حرکت و ذخیره‌سازی آب در خاک، تهویه و فرسایش خاک، فعالیت‌های زیستی و رشد محصول تأثیر می‌گذارد (۲۳).

عوامل غالب خاک‌سازی در خاک‌های متفاوت (راسته‌های مختلف) به شکل‌های گوناگونی بر تشکیل ساختمان خاک اثر می‌گذارند. در خاک‌هایی با مقادیر کم کربن آلی و رس، خاکدانه‌سازی بیش‌تر به وسیله کاتیون‌های چندظرفیتی کنترل می‌شود و با وجود مقادیر کافی ماده آلی و رس، نقش کاتیون‌ها در این خصوص به حداقل می‌رسد (۷). در اریدی‌سول‌ها پایداری خاکدانه‌ها بیش‌تر مدیون وجود کرنات‌ها است (۶).

محدوده مقیاس اندازه‌ای واحدهای ساختمانی و تأثیر عوامل

ساختمان خاک یک موضوع کلیدی در بخش مدیریت منابع خاک است که با هدف رعایت استانداردهای زیست‌محیطی و ارتقای توان تولید پایدار منابع، مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: ad.karami@areeo.ac.ir)

۲- دانش آموخته، بخش خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس، شیراز، ایران

۳- دانشجوی دکتری، بخش خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

خاک و پایداری خاکدانه‌ها در کاربری‌های مختلف (۱۳، ۲۱، ۳۸ و ۵۰)، شناخت غیریکنواختی محیط‌های طبیعی (۲۳) و برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (۳) استفاده کرده‌اند. بُعد فرکتالی هم با استفاده از توزیع اندازه خاکدانه‌ها (۵ و ۲۹) و هم با استفاده از توزیع اندازه ذرات (۲۷) محاسبه می‌گردد.

پیرمردیان و همکاران (۳۸) در بررسی اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر پایداری خاکدانه‌ها، پارامتر بُعد فرکتالی غیرخطی (D_n) را حساس‌تر از MWD و GMD گزارش نمودند و توصیه کردند که از بُعد فرکتالی به دلیل پایه تئوری قوی‌تر برای بررسی پایداری خاکدانه‌ها استفاده شود.

مقادیر بالاتر بُعد فرکتالی نشان دهنده تکه‌تکه شدن بیشتر خاکدانه‌ها و پایداری کمتر آن‌ها می‌باشد، یعنی در فرآیند تعیین اندازه خاکدانه‌ها با الگ کردن آنها، خاکدانه‌ها عمدتاً به اندازه‌های ریزتر تبدیل می‌شوند. مقادیر پایین بُعد فرکتالی، بیان‌کننده این است که خاکدانه‌ها از نظر اندازه، عمدتاً از خاکدانه‌های بزرگتر تشکیل شده‌اند (۱۳). در برخی مدل‌سازی‌ها از جرم ویژه ظاهری و توزیع اندازه منافذ به عنوان عوامل مؤثر بر ساختمان خاک استفاده می‌شود (۴۸). بُعد فرکتالی خاک به عنوان شاخصی برای بیان درجه بهم‌خوردگی خاک، خرد و منقطع شدن منافذ را به خوبی نشان می‌دهد (۱۴).

ساختمان خاک در طبیعت دارای تغییرپذیری بالایی است و شبیه‌سازی شرایط واقعی خاک و مطالعه آن بسیار ارزشمند می‌باشد. احتمالاً با هندسه فرکتالی می‌توان اطلاعات قابل قبولی از ساختمان خاک به دست آورد. مطالعات محدودی با استفاده از هندسه فرکتالی برای بررسی ساختمان خاک انجام شده است و تاکنون پژوهش مدوتی که ساختمان خاک و ارتباط آن با دیگر ویژگی‌های خاک را در راسته‌های مختلف خاک بررسی کرده باشد انجام نشده است. از طرف دیگر استفاده از هندسه فرکتالی برای توصیف و مدل کردن محیط متخلخل ناهمگون از جمله خاک، زمینه بسیار مساعدی برای تحقیق مفاهیم مختلف است (۳۶).

پیرمردیان و همکاران (۳۸) بیان نموده‌اند که بُعد فرکتالی می‌تواند پایداری خاکدانه‌ها را در کاربری‌های مختلف توصیف و کمی کند. با توجه به نتایج پژوهش مزبور، بررسی و کمی‌سازی ساختمان خاک که در اکثر موارد به صورت کیفی بیان می‌شود، می‌تواند مسیر تازه‌ای را در مطالعه ساختمان خاک ایجاد نماید که روشن‌گر راه برای مدل و کمی کردن ساختمان خاک با استفاده از دیگر ویژگی‌های خاک باشد که در پژوهش حاضر تا حدودی به هدف مزبور پرداخته شد. در آینده نیز سعی بر آن خواهد بود که به کمی‌سازی و مدل کردن ساختمان خاک در هر راسته با توجه به شرایط خاص هر راسته و این که عوامل مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها در هر راسته چه تغییراتی داشته باشند و چه روندی حاکم باشد پرداخته خواهد شد.

مختلف بر آن در خاک‌های مختلف وسیع است و بعید به نظر می‌رسد که یک روش آزمایشگاهی به تنهایی بتواند پاسخ‌های کاملی برای تمام این محدوده وسیع ارائه نماید. به کارگیری روش‌های مختلف ارزیابی ساختمان خاک و عوامل مؤثر بر آن، نیازمند مطالعه روابط بین کلاس‌های اندازه خاکدانه‌ها و فرآیندهای مختلف خاکدانه‌سازی است. این روش‌ها اطلاعات مختلفی را ارائه می‌کنند که سودمندی آن‌ها دقیقاً وابسته به هدف مورد مطالعه می‌باشد (۷).

محققین به بررسی روش‌های مختلف برای ارزیابی ساختمان خاک پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که به لحاظ کمی‌سازی مفاهیم اساسی فیزیک خاک و استفاده کاربردی از ساختمان خاک، بررسی روش‌های به‌روز و کارآمد اهمیت فراوانی دارد (۱۲). از توزیع اندازه خاکدانه‌ها به عنوان شاخصی برای توصیف کمی ساختمان خاک استفاده می‌شود. پژوهشگران در اوایل با استفاده از یک پارامتر منفرد و با در نظر گرفتن درصد وزنی خاکدانه‌های بزرگتر از یک اندازه معین، که این اندازه به دلخواه تعیین می‌شد، به تشخیص توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌پرداختند. در این روش، توزیع اندازه خاکدانه‌های کوچک‌تر و بزرگتر از اندازه مزبور نادیده گرفته می‌شد (۳۹). به همین دلیل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها^۱ (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها^۲ (GMD) به عنوان دو شاخص تجربی برای توصیف توزیع اندازه خاکدانه‌ها به صورت کمی ارائه شده است. شاخص MWD بخش کوچکی از پیچیدگی ساختمان خاک را دربر می‌گیرد، این شاخص با یکپارچه دیدن بخش‌های اندازه خاکدانه‌ها اطلاعات قسمتی از خاکدانه‌ها از دست رفته و نتیجه به نفع اندازه بزرگتر الگ تمام می‌شود (۸ و ۹). در دو دهه اخیر نگرش فرکتالی به عنوان ابزاری نیرومند برای مدل کردن پدیده‌های پیچیده به کار رفته است. رفتار فرکتالی خاک بر پایه مفاهیم هندسه فرکتالی و قوانین حاکم بر آن تبعیت کرده و از توزیع اندازه ذرات و فضای منافذ خاک برای تعیین بُعد فرکتالی استفاده می‌شود. بنابراین بُعد فرکتالی برای تفکیک خاک‌ها و در کمی‌سازی ساختمان آن‌ها کاربرد داشته و روشی مفید می‌باشد (۳۸). دلیل اصلی برای استفاده از تئوری فرکتالی در بیان کمی ساختمان خاک این است که خرد شدن خاکدانه‌ها تا حدی خود متشابه است و ذرات بزرگتر به آسانی به ذرات ریزتر متشابه خرد می‌شوند (۲۰). پژوهشگران هندسه فرکتالی را برای توصیف فیزیکی به جای بیان ریاضی پیشنهاد داده‌اند و دانشمندان خاک درباره فرکتالی بودن خاک و روش‌های تخمین آن بررسی‌هایی انجام داده‌اند (۹).

پژوهشگران متعددی به‌طور موفقیت‌آمیزی از مدل‌های فرکتالی برای مدل‌سازی توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک (۳۳)، نگهداشت آب توسط خاک (۳۵)، مطالعه ساختمان خاک و کمی‌سازی ساختمان

1- Mean Weight Diameter

2- Geometric Mean Diameter

خاکدانه‌ها (GMD) را پیشنهاد نمود. گاردنر (۱۷) طی پژوهشی GMD را در تحقیقات خود به کار برد و کشف کرد که برای توزیع اندازه خاکدانه‌ها در بیش‌تر نمونه‌ها توزیع لگاریتم نرمال نسبت به توزیع نرمال نتایج بهتر و قابل قبول‌تری نشان می‌دهد و توزیع لگاریتم نرمال این شانس را فراهم می‌کند که توصیف واقعی توزیع اندازه خاکدانه‌ها را با دو پارامتر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و لگاریتم انحراف استاندارد بیان شود.

ساختمان خاک نقش زیادی در فرآیندها و عملکرد خاک دارد ولی به‌صورت کیفی نمی‌تواند در این مدل‌ها نقش‌آفرینی کند. بنابراین اهداف این پژوهش مطالعه و کمی‌سازی ساختمان خاک با استفاده از هندسه فرکتالی و شاخص‌های MWD و GMD در راسته‌های مختلف خاک، مقایسه شاخص‌های MWD و GMD و پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها در ارزیابی ساختمان خاک و تعیین رابطه پارامترهای فرکتالی با MWD و GMD و دیگر ویژگی‌های خاک بود.

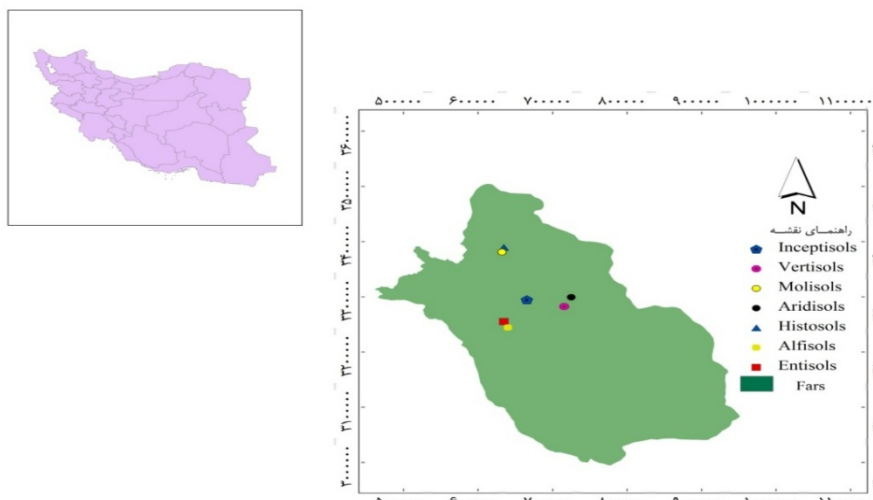
مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

با بررسی نقشه‌ها و گزارش‌های خاکشناسی در استان فارس، نقاط مطالعاتی بر اساس خاک‌های شاهد ارائه شده برای راسته‌های مختلف موجود در استان شامل انتی‌سول (۳ افق)، اریدی‌سول (۵ افق)، مالی‌سول (۴ افق)، اینسپتی‌سول (۴ افق)، آلفی‌سول (۴ افق)، ورتی‌سول (۴ افق) و هیستوسول (۳ افق) انتخاب گردیدند (شکل ۱). با حفر نیم‌رخ خاک و تشریح آنها بر اساس افق‌های مشخصه خاک، تعداد ۲۷ نمونه خاک به تعداد افق‌ها تهیه گردید (۴۳).

در خصوص مفاهیم شاخص‌های MWD و GMD، مدل میانگینوزنی‌قطر خاکدانه‌ها بر اساس توزیع متقارن متغیر مستقل X (اندازه خاکدانه‌ها) در اطراف میانگین تعریف می‌شود. با فرض نرمال بودن توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک نخستین بار توسط پوری و پوری (۳۹) شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ارائه گردید. وان‌باول (۴۷) شاخصی را با روش گرافیکی و از طریق محاسبه‌ی سطح زیر منحنی توزیع تجمعی به‌دست آورد که رابطه‌ی بسیار نزدیکی با شاخص پوری و پوری (۳۹) داشت. در محاسبه‌ی عددی میانگین وزنی قطر به‌منظور سهولت محاسبات، منحنی حدفاصل بین دو اندازه‌ی متوالی الک‌ها، خطی در نظر گرفته می‌شود، لذا اعداد به‌دست آمده از روش پوری و پوری (۳۵) در مقایسه با شاخص گرافیکی توزیع اندازه‌ی وان‌باول (۴۷)، بیش‌برآورد داشته است. در توزیع نرمال مقدار تفاوت‌ها از میانگین یکسان بوده و شاخص‌های تمایل به مرکز یعنی میانه، مُد و میانگین بر هم منطبقند. به‌عنوان مثال در مورد ذرات خاک به این مفهوم است که احتمال یافتن ذراتی با ابعاد مثلاً ۱۰ درصد بزرگتر از میانگین برابر احتمال یافتن ذراتی با ابعاد ۱۰ درصد کوچکتر از میانگین است که البته امکان تحقق مطلق چنین فرضی در مورد خاک طبیعی کمی بعید به نظر می‌رسد. علاوه بر این در نمودار توزیع نرمال در بخش‌هایی از منحنی، عدد اندازه ذرات، منفی برآورد می‌شود (در پایین‌ترین حد تابع نرمال $x = -\infty$) به همین علت فرضیه‌ی نرمال بودن توزیع اندازه‌ی خاکدانه‌ها به‌صورت مطلق، حداقل از لحاظ تئوریک، فرضیه‌ی قابل قبولی نمی‌تواند باشد (۱۲).

چنانچه لگاریتم یک متغیر $(\log x)$ دارای توزیع نرمال باشد، متغیر مورد نظر (x) از یک توزیع نرمال لگاریتمی تبعیت می‌کند. بر این اساس، مزوراک (۲۵) به جای میانگین وزنی، میانگین هندسی قطر



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری
Figure 1- Location of study area and sampling points

مدل ریو و اسپوزیتو (۴۲):

$$N(d_i) = \frac{M(d_i)}{(d_i^3 \rho_i)} \quad (3)$$

$N(d_i)$: تعداد خاکدانه‌ها، d_i : میانگین قطر خاکدانه‌ها (m)،
 $M(d_i)$: جرم خاکدانه‌ها (kg)، ρ_i : جرم مخصوص ظاهری خاکدانه‌ها
 (Mg.m^{-3}). تعداد خاکدانه‌ها از بزرگترین کلاس تا کلاس k ام از
 فرمول $N_k = \sum_{i=0}^k N(d_i)$ محاسبه و با استفاده از مدل فرکتالی زیر
 D_n تعیین گردید:

$$0 < D_n < 3 \quad N_k = A d_k^{-D_n} \quad (4)$$

d_k : میانگین قطر خاکدانه‌ها برای کلاس k ام است. شیب منحنی
 $\log N_k$ در مقابل $\log d_k$ همان $-D_n$ است.
 در این مدل شکل خاکدانه‌ها مستقل از مقیاس فرض می‌شود. A
 فراوانی خاکدانه‌های بزرگتر را نشان می‌دهد و برای تعیین تفاوت
 کمی میان تیمارها به کار برده می‌شود (۱۵).
 مدل تیلر و ویت کرافت (۴۶):

$$\frac{M(x < X)}{Mt} = \left(\frac{x}{XL}\right)^{3-D_m} \quad (5)$$

که در آن:

D_m : بُعد فرکتال جرمی، $M(x < X)$: جرم تجمعی خاکدانه‌ها بر
 روی غربال‌ها با اندازه‌های کوچکتر از x ، Mt : جرم کل خاکدانه‌ها
 (باقی‌مانده بر روی تمام غربال‌ها)، XL : بالاترین اندازه منفذ غربال و
 x : میانگین قطر خاکدانه‌ها در هر کلاس است.
 پس از الک کردن با رگرسیون لگاریتمی داده‌ها، مقدار D_m
 محاسبه شد. در این مدل، چگالی ظاهری و شکل خاکدانه‌ها مستقل
 از مقیاس فرض می‌شود و برای ذرات خاک نیز می‌توان از آن استفاده
 کرد.

ارزیابی دقت مدل‌های فرکتالی

برای تعیین کارایی و دقت مدل‌ها از آماره‌های ریشه دوم میانگین
 مربعات خطا^۱ (RMSE)، ضریب تبیین^۲ (R^2)، میانگین خطا^۳ (ME)،
 مجموع مربعات باقیمانده (RSS) و معیار اطلاعات اکایک (AIC)^۴
 (۱) استفاده شد.

نمونه‌های خاک تهیه شده از افق‌های مشخصه خاک به
 آزمایشگاه منتقل و پس از هواخشک نمودن، مقداری از نمونه‌های
 خاک تهیه شده از افق‌های مشخصه خاک به آزمایشگاه منتقل و پس
 از هواخشک نمودن، مقداری از نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری برخی
 ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از الک ۲ میلی‌لیتری عبور داده
 شدند. ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌ها شامل EC و pH در عصاره گل
 اشباع (۳۰)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر، درصد گچ به
 روش ایجاد رسوب با استفاده از استون و درصد آهک به روش
 تیتراسیون با اسید (۴۴) اندازه‌گیری گردیدند. جرم مخصوص ظاهری
 با به‌کارگیری سیلندرهاى نمونه‌برداری و پس از خشک کردن نمونه‌ها
 در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون تعیین شد (۱۹). برای
 اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات خاک از روش هیدرومتری (۱۸) استفاده
 شد. روش‌های مختلفی برای الک کردن خاکدانه‌ها وجود دارد که
 برخی از آن‌ها شامل الک افقی (Horizontalsieving)، عبور عمودی
 خاکدانه‌ها (Throw-actionsieving)، الک کردن خاکدانه‌ها با
 ضربات آهسته و پیوسته (Tapping sieving)، الک صوتی (Sonic
 sieving)، الک تر (Wet sieving) که عمدتاً برای خاکدانه‌های
 ریز استفاده می‌شود و هوای حبس شده در خاکدانه‌ها مشکل ایجاد
 می‌کند، الک با جریان سریع هوا (Air Jet Sieving) و الک خشک
 (Dry sieving) می‌باشد و محققین متعددی از روش الک خشک
 برای تعیین پایداری ساختمان خاک استفاده کرده‌اند (۵ و ۲۹). در این
 پژوهش نیز از روش سری الک خشک برای تعیین توزیع اندازه
 خاکدانه‌ها با قطرهای ۰/۴۲، ۰/۸۴، ۰/۱۷۵، ۰/۳۵، ۰/۷۰، ۰/۱۴۰ و
 ۰/۲۸ میلی‌متر (۱۲ و ۲۲) استفاده شد و سپس داده‌های مزبور به‌منظور
 تعیین میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها به‌صورت زیر استفاده
 گردیدند (۲۴):

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

$$GMD = \exp \left[\left(\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{x}_i \right) / \sum_{i=1}^n w_i \right] \quad (2)$$

MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)، GMD: میانگین
 هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)، \bar{x}_i : میانگین قطر خاکدانه‌ها در هر
 گروه قطری (mm)، W_i : جزء وزنی خاکدانه‌ها در آن گروه قطری، n :
 تعداد الک به‌کار رفته در آزمایش و i : شاخص اندازه کلاس می‌باشند.

محاسبه پارامترهای فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها

با استفاده از توزیع اندازه خاکدانه‌ها و جرم مخصوص آن‌ها و با
 به‌کارگیری مدل‌های زیر، بُعد و ویژگی‌های فرکتالی محاسبه گردیدند.

- 1- Root Mean Square Error
- 2- Coefficient of Determination
- 3- Mean Error
- 4- Akaike Information Criterion

آن است که رس از ۲۲ تا ۶۷ سیلت از ۱۸ تا ۵۹ و شن از ۵ تا ۵۱ درصد متغیر است (جدول ۱). توزیع بافت ۲۷ نمونه خاک در مثلث بافت خاک نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها در کلاس‌های بافتی متوسط تا سنگین قرار دارند (شکل ۲).

بُعد فرکتالی برای مدل ریو و اسپوزیتو از ۲/۲۹ تا ۴/۰۱ تغییرات داشت که میانگین آن ۲/۷۱ بود (جدول ۱). در حقیقت خاکدانه‌ها شکل سه‌بُعدی داشته و باید بُعد آن سه باشد و در هندسه فرکتالی هم که بُعد عدد کسری است منطقی است که خاکدانه‌ها که ویژگی شی فرکتالی را دارند به عدد سه نزدیک باشند، انتظار می‌رود که مقدار عددی بُعد خاکدانه‌ها اختلاف معنی‌داری با عدد ۳ نداشته باشد و اعداد کوچکتر بیان‌کننده خاکدانه‌های پایدارتر می‌باشد. محققان نیز دامنه تغییرات بُعد فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو را از ۰/۶۷ تا ۳/۹۲ گزارش کرده‌اند (۳۷). در مدل مزبور از کل نمونه‌ها، ۳ نمونه که مربوط به راسته هیستوسول است دارای بُعد فرکتالی بزرگتر از ۳ بود (جدول ۲). برای حصول اطمینان از این که آیا اعداد به‌دست آمده واقعاً از ۳ بزرگتر است، در محیط SPSS آزمون معنی‌داری بر مبنای LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد و ملاحظه گردید که در مدل مذکور هر سه نمونه به‌طور معنی‌داری بُعد فرکتالی بزرگتر از ۳ دارند. مقادیر بُعد فرکتالی بزرگتر از ۳ به این معنی است که قطعات در سطوح مختلفی از خردشوندگی فرکتالی باقی مانده‌اند (۳۸). در رابطه با تفسیر این امر ریو و اسپوزیتو (۴۲) بیان کرده‌اند که در ساختمان خاک، خردشوندگی به‌طور کامل صورت نگرفته است. در هیستوسول‌ها به‌دلیل وجود ماده آلی زیاد احتمال تشکیل خاکدانه‌های پایدارتر وجود دارد از طرفی با وجود انبوهی از ریشه‌ها احتمال شکست خاکدانه‌ها بدون روند مشخص نیز وجود دارد که شرایط این راسته را استثناء می‌کند. پارت و همکاران (۳۱) گزارش کرده‌اند که اگر ذرات خرد شده هیچ شباهتی به آرایش اولیه‌اشان نداشته باشند، ممکن است بُعد فرکتالی از ۳ بیشتر شود. به‌دلیل این که خاکدانه‌های بزرگتر از خاکدانه‌های کوچکتر تشکیل شده در یک نیروی وارد شده معین، احتمال شکست خاکدانه‌های بزرگتر بیشتر از خاکدانه‌های کوچک می‌باشد، بُعد فرکتالی می‌تواند به مقدار $3+2$ برسد که 2 احتمال شکست آغازکننده‌ها را مشخص می‌کند (۳۱). مدل تیلر و ویت‌کرافت (۴۶) نیز برای حل این مسئله پیشنهاد شده است که در پژوهش حاضر مقدار بُعد فرکتالی مدل مزبور از ۲/۲۹ تا ۲/۷۹ تغییرات داشت که میانگین آن ۲/۴۹ بود (جدول ۱). مدل تیلر و ویت‌کرافت بر اساس جرم و مدل ریو و اسپوزیتو بر اساس تعداد، بُعد فرکتالی را محاسبه می‌کند و این دو مدل با ماهیت متفاوت ایجاد شده و هر کدام در شرایطی سازگارتر هستند.

$$AIC = N \ln \left[\sum_{i=1}^N \frac{(\theta_m - \theta_p)^2}{N} \right] + 2n_p \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (۷)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{N} \quad (۸)$$

$$RSS = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (۹)$$

$$AIC = N \ln \left[\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \right] + 2n_p \quad (۱۰)$$

در روابط فوق \hat{y}_i : مقدار پیش‌بینی شده برای نمونه i ام، y_i : مقدار مشاهده شده برای نمونه i ام، n_p : تعداد پارامترهای مدل که باید برآورد شوند و N : تعداد نمونه‌های خاک می‌باشد.

پارامترهای آنالیز آماری کلاسیک شامل میانگین، کمینه، بیشینه و انحراف استاندارد و همچنین همبستگی ساده خطی بین شاخص‌های برآورد شده و مقایسه میانگین‌ها (بر مبنای آزمون LSD در سطح احتمال ۵) با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS محاسبه گردید. در آنالیزهای آماری نرمال بودن داده‌ها بررسی و در صورت نرمال نبودن سری داده‌ای، در ابتدا داده‌ها نرمال شد و سپس آنالیز انجام گردید.

نتایج و بحث

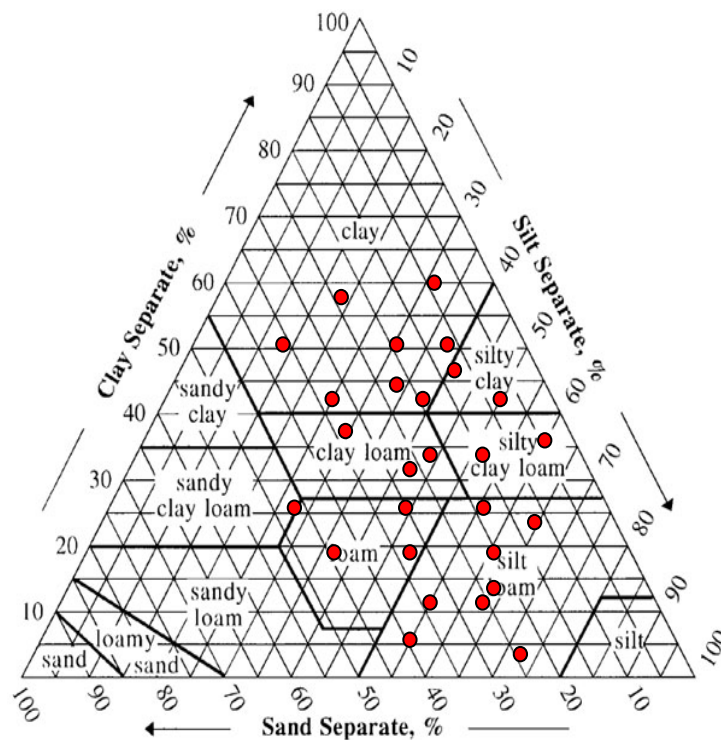
ویژگی‌های آماری همه متغیرهای بررسی شده در این پژوهش (که مشاهده شده و یا از طریق مدل‌های فرکتالی برآورد شده‌اند) در جدول ۱ نشان داده شده است. متغیرهای مربوط به ویژگی‌های خاک و نیز بُعد فرکتالی هر دو مدل، دارای دامنه تغییرات بالایی بودند که دلالت بر بالا بودن تنوع ویژگی‌های خاک در راسته‌های مورد مطالعه است (جدول ۱). متغیرهای با تغییرات بالا، بیشتر تحت تأثیر عملیات مدیریتی قرار می‌گیرند (۱۱). در راسته‌های خاک مورد مطالعه نوع پوشش گیاهی و عملیات خاک‌ورزی غالب متفاوت بود و از طرف دیگر بر اساس شرایط آب و هوایی مختلف در هر راسته، عوامل غالب خاک‌سازی به شکل‌های گوناگونی بر ویژگی‌های خاک اثر گذاشته و در نتیجه موجب ایجاد تنوع شده است. شوری خاک و ماده آلی دارای بیشترین تغییرات بودند و این به‌ترتیب به‌دلیل وجود راسته‌های اریدی‌سول (شوری زیاد) و هیستوسول (ماده آلی زیاد) می‌باشد (جدول ۱). اسیدیته خاک کمترین تغییرات را داشت و علت آن پایداری بیشتر این متغیر و قدرت بافری خاک است (۲۶). توزیع اندازه ذرات گویای

جدول ۱- ویژگی‌های آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده

Table 1- The statistical properties of measured variables

متغیر Variable	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	میانگین Average	انحراف استاندارد Standard deviation	ضریب‌تغییرات Coefficient of variation	چولگی Skewnes
EC	0.5	71.00	12.40	23.85	192	1.75
SP	26.00	65.15	42.10	10.45	21.9	0.079
T.N.V	35.00	78.0	54.00	11.80	25	0.68
pH	7.60	8.60	8.10	0.20	2.9	-0.22
OC	0.20	40.20	4.60	11.30	247	2.5
GP	1.70	21.00	6.3	5.80	91	1.5
Caly	22.00	67.0	43.40	13.80	31.7	-0.05
Silt	18.00	59.0	37.70	9.60	25.5	0.345
Sand	5.00	51.00	19.00	11.60	61	1.19
BD	0.50	1.60	1.30	0.30	21.9	-1.82
MWD	2.29	16.47	9.51	3.22	33.8	-0.576
GMD	1.08	2.87	2.01	0.40	19.9	-0.751
AR	0.02	0.15	0.05	0.03	65	2.13
D _n R	2.29	4.01	2.71	0.42	15.5	2
D _m T	2.29	2.79	2.49	0.13	5.5	0.747

EC: قابلیت هدایت الکتریکی (ds/m)، SP: درصد اشباع، T.N.V: درصد مواد خنثی شونده، pH: واکنش گل اشباع، OC: درصد کربن آلی، Gp: درصد گچ، Clay: درصد رس، Silt: درصد سیلت، Sand: درصد شن، BD: جرم مخصوص ظاهری (g/cm³)، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)، AR: پارامتر فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو، D_nR: بُعد فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو، D_mT: بُعد فرکتالی مدل تیلر و ویت‌کرافت.



شکل ۲- توزیع بافت خاک در نمونه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه
Figure 2- Soil texture distribution of different samples in study area

پایداری خاکدانه‌ها (MWD و GMD) مقدار عددی این معیارها برای هر راسته بررسی شد (جدول ۲).

شاخص‌های توزیع اندازه خاکدانه‌ها و بُعد فرکتالی به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های فرکتالی ریو و اسپوزیتو و تیلر و ویت‌کرافت با دو روش تجربی متداول بیان‌کننده

جدول ۲- مقایسه میانگین شاخص‌های توزیع اندازه خاکدانه‌ها و بُعد فرکتالی راسته‌های مختلف

Table 2- Average comparison of aggregates size distribution indices and fractal dimension of different orders

راسته‌ها Orders	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)MWD	میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها GMD (mm)	بعد فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو D_nR	بعد فرکتالی مدل تیلر و ویت کرافت D_mT
Histosol هیستوسول	2.620 ^b	1.133 ^c	3.799 ^a	2.770 ^a
Inceptisol انسپتی‌سول	11.448 ^a	2.285 ^a	2.486 ^c	2.404 ^{bc}
Entisol انتی‌سول	9.723 ^a	2.153 ^{ab}	2.453 ^c	2.363 ^c
Alfisol آلفی‌سول	10.685 ^a	2.147 ^{ab}	2.578 ^{bc}	2.449 ^{bc}
Malisol مالی‌سول	10.415 ^a	2.180 ^{ab}	2.639 ^{bc}	2.398 ^{bc}
Aridisol اریدی‌سول	9/024 ^a	1.897 ^b	2.733 ^b	2.548 ^b
Vertisol ورتی‌سول	10.905 ^a	2.225 ^{ab}	2.418 ^c	2.400 ^{bc}

در هر ستون میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف یکسان باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

خاکدانه‌ها که خود نتیجه‌ای از شرایط مختلف است، استفاده می‌شود. نتایج همبستگی ساده نشان داد که MWD و D_mT با D_nR نیز رابطه آن‌ها ارائه گردیده است. مقایسه نمودارهای رسم شده با رابطه خطی به دست آمده در جدول ۳ نشان می‌دهد که در مواردی رابطه خطی نتوانسته همبستگی بین متغیرها را نشان دهد، که با رسم همبستگی غیرخطی رابطه بین متغیرها بهتر نشان داده شده است (شکل ۳). این نتایج با نتایج تحقیقات دیازوریتا و همکاران (۱۲) که به بررسی روش‌های مختلف برای ارزیابی ساختمان خاک پرداخته‌اند، مطابقت دارد. این محققان نیز در برخی موارد همبستگی غیرخطی بین متغیرها را نسبت به همبستگی خطی ترجیح داده‌اند.

رابطه منفی و معنی‌دار D_nR با GMD و MWD بیانگر آن است که با افزایش خاکدانه‌سازی، بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد (۳۸ و ۴۹). گولسر (۲۰) نیز رابطه منفی بین D_nR با MWD را گزارش کرده است. پرفکت و کی (۳۳) و اقبال و همکاران (۱۵) بیان کرده‌اند افزایش فرآیند خاکدانه‌سازی که در GMD منعکس می‌گردد باعث کاهش بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌شود. در این راستا پژوهشگران با بیان این که افزایش خاکدانه‌های درشت‌تر موجب کاهش D_mT می‌گردد رابطه مشابهی را گزارش کرده‌اند (۲۰، ۳۳ و ۴۱).

مقدار بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها مربوط به هر دو مدل در راسته هیستوسول زیاد بود (جدول ۲) که بیانگر تکه‌تکه شدن زیاد خاکدانه‌ها در این راسته است که با توجه به رابطه عکس شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها با بُعد فرکتالی این نتیجه تأکیدی بر کاهش پایداری خاکدانه‌ها در راسته هیستوسول می‌باشد. این احتمال وجود دارد که راسته هیستوسول، شاید خاصیت فرکتالی ندارد یا حداقل با توجه به شرایط خاص آن در این پژوهش، این نتیجه حاصل گردیده است، یا اینکه باید از مدل‌های دیگر استفاده شود. در عمل هم، نمونه خاک هیستوسول توده‌ای از ریشه‌ها بود که با خاکدانه‌های ریز خاک

گر چه بیشترین مقدار MWD و GMD مربوط به راسته انسپتی‌سول می‌باشد به غیر از راسته هیستوسول که استثناء بود مقادیر MWD در راسته‌های مختلف اختلاف معنی‌داری نداشت، با معیار GMD هم اختلاف معنی‌دار با راسته اریدی‌سول داشت (جدول ۲). ضعیف بودن ساختمان خاک در راسته اریدی‌سول که مشخص است. اما علت این که اختلافات در بین این راسته‌ها کم است تقریباً یکنواختی عوامل موثر بر ساختمان خاک می‌باشد که در حال حاضر این راسته‌ها در یک منطقه تقریباً خشک قرار گرفته‌اند تأثیرگذاری رس و آهک بر پایداری ساختمان پورنگ بوده و وجود این دو در راسته‌های مختلف این نتیجه را ایجاد کرده، عامل دیگر مدیریت اراضی است که بر مقادیر این شاخص‌ها تأثیر گذاشته است.

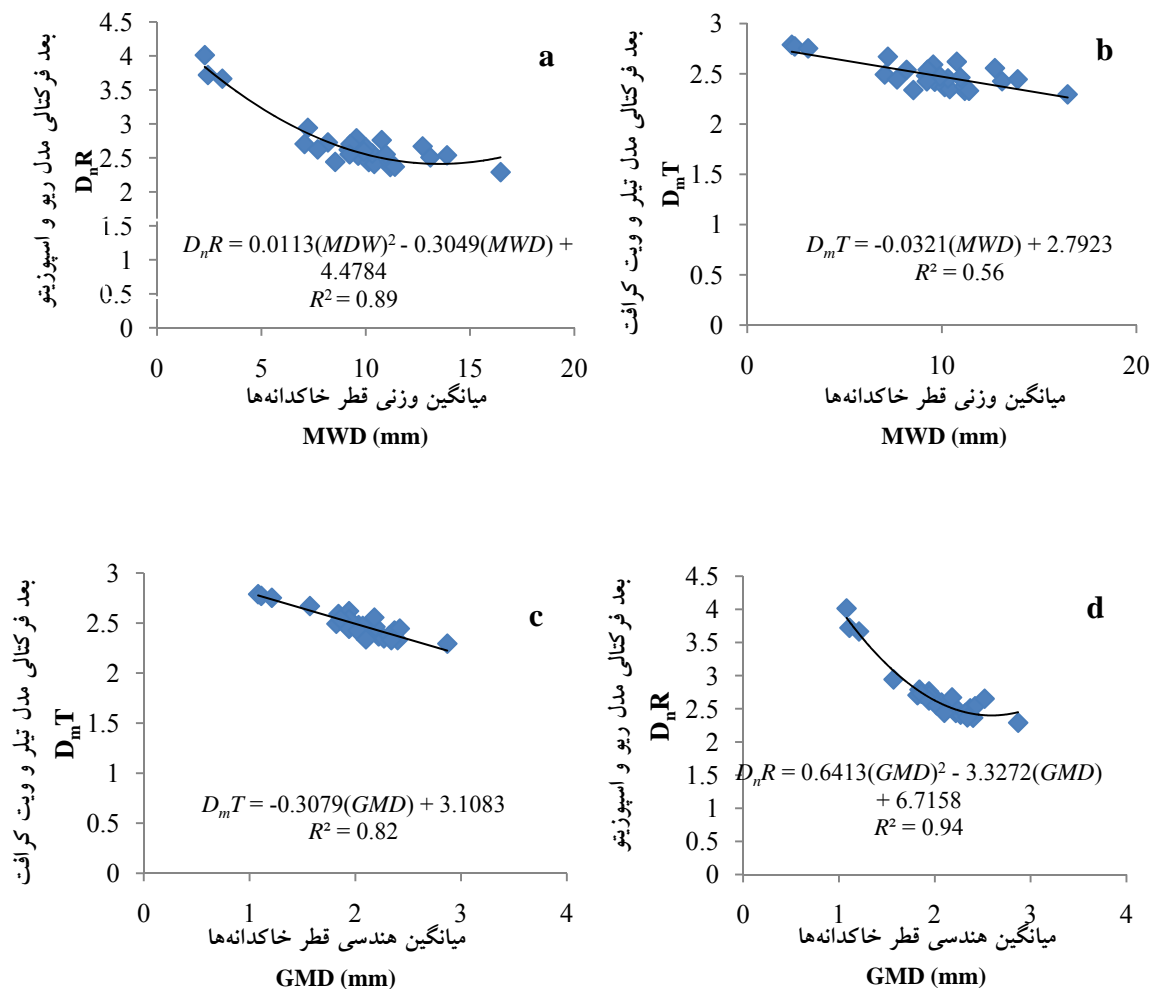
عوامل غالب خاک‌سازی و ویژگی‌های مختلف خاکی، مهمترین عوامل در خردشدگی و تشکیل خاکدانه‌ها و به دنبال آن پایداری متفاوت خاکدانه‌ها در راسته‌های مختلف می‌باشد (۶). این درحالی است که نتایج به وضوح بیان کننده آن است که MWD نتوانسته است به خوبی اختلاف در پایداری خاکدانه‌ها را در راسته‌های مختلف نشان دهد (جدول ۲).

شاخص MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را بر اساس جرم‌های باقیمانده بر روی هر الک نشان می‌دهد. اگرچه این می‌تواند یک شاخص پایداری خاکدانه‌ها باشد، ولی به دلیل این که یک خاکدانه با قطر چهار میلی‌متر، تقریباً ۱۰ برابر یک خاکدانه با قطر ۰/۴ میلی‌متر وزن دارد، باعث بیش‌برآورد در محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها می‌گردد. در میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها هر چند این خطا برطرف شده است، ولی توابع توزیع لگاریتمی بر این فرض استوار هستند که احتمال شکست خاکدانه‌ها در تمامی اندازه‌ها یکسان است و این فرض برای خرد شدن خاکدانه‌ها نمی‌تواند صادق باشد، چرا که خاکدانه‌های بزرگ به راحتی و بیشتر به خاکدانه‌های ریز، خرد می‌شوند (۲). بُعد فرکتالی یک شاخص از خردشوندگی است که در مقیاس‌های مختلف روی می‌دهد و برای محاسبه آن از قطر، جرم و چگالی

فرکتالی به مدیریت‌های مختلف پرداخته‌اند نیز نشان داده‌اند که پارامترهای مدل ریو و اسپوزیتو در برابر مدیریت‌های مختلف حساس‌تر بوده و سریعتر تغییر می‌کنند که نشان از همبستگی بیشتر پارامترهای این مدل با عوامل مدیریتی می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر همچنین نشان داد که D_nR بهتر از D_mT توانسته است اختلاف بین راسته‌های مختلف را نشان دهد (جدول ۲). همچنین ضریب همبستگی بین D_mT و D_nR با GMD بیشتر از MWD به دست آمد (شکل ۳).

درهم تنیده بودند و عملاً مثل سایر راسته‌ها خاکدانه‌های درشت دیده نشد و با سایر راسته‌ها تفاوت فاحش داشت. نتیجه مزبور با توجه به شرایط خاص این راسته در پژوهش حاضر به دست آمده است که قابل تعمیم به اکثریت نیست و نیازمند مطالعات گسترده‌تر با نمونه‌های بیشتر در این راسته می‌باشد.

ضریب همبستگی بین D_nR با شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها بیشتر از D_mT به دست آمد (شکل ۳) که این می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت بیشتر D_nR نسبت به D_mT در برابر عوامل خاکدانه‌سازی باشد. فیلگویرا و همکاران (۱۶) که به بررسی حساسیت پارامترهای



شکل ۳- رابطه بُعد فرکتالی مدل‌های ریو و اسپوزیتو و تیلر و ویت کرافت با میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها

Figure 3- Relationship between fractal dimension of Riue and Sposito and Taylor and Wheatcraft models with mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregates

اندازه خاکدانه‌ها بهتر از MWD می‌تواند اختلاف پایداری خاکدانه‌ها

با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد بُعد فرکتالی توزیع

با پایداری است در برآورد بُعد فرکتالی استفاده شود، مطالعات مختلف نیز تأیید کننده این موضوع است. در این پژوهش نیز از توزیع اندازه خاکدانه‌ها استفاده گردیده است. در پژوهش‌های مختلف همانند پژوهش حاضر ارتباط بین بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها و ساختمان یا پایداری خاک عکس می‌باشد. پژوهشگران نیز بیان کرده‌اند که با افزایش درصد شن خاک، بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها افزایش یافته‌است (۲۷). وجود ذرات شن عامل ضعیف کننده پیوند ذرات به همدیگر بوده و پایداری ساختمان خاک را کاهش می‌دهد که به دنبال آن بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. رس با همآوری ذرات و افزایش خاکدانه‌سازی موجب کاهش بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌گردد (۴۱). رابطه بین D_mT با درصد سیلت توسط محققین نیز منفی و معنی‌دار به دست آمده است (۲۳). مشابه نتایج به دست آمده در این پژوهش، همبستگی منفی D_mT با درصد رس و همبستگی مثبت آن با درصد شن نیز گزارش شده است (۴۵). بین D_mT و D_nR (بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها) و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها رابطه عکس وجود داشت. پژوهشگران نیز بیان کرده‌اند که با افزایش درصد شن خاک بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها افزایش یافته‌است (۲۴). رس با همآوری ذرات و افزایش خاکدانه‌سازی موجب کاهش بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌گردد (۳۸). رابطه بین D_mT با درصد سیلت توسط محققین نیز منفی و معنی‌دار به دست آمده است (۲۲). مشابه نتایج به دست آمده در این پژوهش، همبستگی منفی D_mT با درصد رس و همبستگی مثبت آن با درصد شن نیز گزارش شده است (۴۲).

همبستگی ساده D_mT و D_nR با کربن آلی مثبت و معنی‌دار و با جرم مخصوص ظاهری منفی و معنی‌دار گردید (جدول ۳). انتظار بود که همبستگی بین بُعد فرکتالی D_mT و D_nR با ماده آلی منفی شود ولی به خاطر شرایط خاص راسته هیستوسول که افق‌های مشخصه این خاک را بیشتر ریشه‌های تجزیه نشده و موئین تشکیل داده‌اند. همچنین به دلیل وجود حجم زیاد ماده آلی در راسته مزبور و مقدار کم آن در دیگر راسته‌ها این نتیجه حاصل شده است. تأثیر و اهمیت زیاد ماده آلی بر بُعد فرکتالی و ساختمان خاک در هر کدام از راسته‌ها مشهود بود. راسپاه و همکاران (۴۱) تأثیر معنی‌دار و منفی حاصل ضرب رس در ماده آلی را به عنوان یک متغیر بر D_nR گزارش کرده‌اند و در نتیجه‌گیری خود بیان داشته‌اند که رس و ماده آلی با افزایش خاکدانه‌سازی موجب کاهش بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌گردد.

در خاک‌های استان فارس و عمده مناطق مورد مطالعه ماده آلی کم و تراکم زیاد خاک به همراه ذرات ریز خاک و سایر عوامل خاکدانه‌سازی، ذرات خاک را به هم چسبیده نگه داشته و در اندازه‌گیری‌ها، خاکدانه‌سازی و پایداری آن به ظاهر افزایش نشان داد.

را در راسته‌های مختلف نشان دهد. پیرمادیان و همکاران (۳۸) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. این محققین در بررسی اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر پایداری خاکدانه‌ها، پارامتر بُعد فرکتالی غیرخطی (D_n) را حساس‌تر از MWD و GMD گزارش نموده‌اند و توصیه کرده‌اند که از بُعد فرکتالی به دلیل پایه تئوری قوی‌تر برای بررسی پایداری خاکدانه‌ها استفاده شود.

ویژگی‌های MWD و GMD همبستگی مثبت و معنی‌داری را با درصد سیلت و BD و همبستگی منفی و معنی‌داری را با SP، مواد آلی و درصد شن داشتند (جدول ۳). این درحالی است که بیر و همکاران (۴) و بیات و همکاران (۳) همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین ماده آلی و MWD گزارش کرده‌اند. با افزایش درصد شن خاک پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. وجود ذرات شن عامل ضعیف کننده پیوند ذرات به همدیگر بوده و پایداری ساختمان خاک را کاهش می‌دهد رس و سیلت با همآوری ذرات و افزایش خاکدانه‌سازی موجب افزایش خاکدانه‌سازی و در نتیجه افزایش مقادیر ویژگی‌های MWD و GMD می‌گردد. در رابطه با ماده آلی باید به شرایط خاص راسته هیستوسول اشاره کرد که چنین نتیجه‌ای را موجب گردیده است. وجود مقدار بسیار زیاد ماده آلی در راسته هیستوسول و مقدار کم ماده آلی در سایر راسته‌ها مشکل ایجاد کرده و این نتیجه می‌تواند برای تحقیقات آینده اهمیت داشته باشد. کاربری اراضی و مدیریت‌های کشاورزی مانند تناوب زراعی، خاک‌ورزی خاک و مواد اصلاح کننده آلی می‌تواند بر ماده آلی خاک تأثیر داشته باشند و در نتیجه موجب تغییراتی در پایداری خاکدانه‌ها گردند. نادلر و همکاران (۲۸) اثر مواد آلی بر ساختمان خاک را تابعی از مقیاس اندازه‌ی ذرات خاک در نظر گرفتند، لذا در خاکدانه‌های با ابعاد رس، مواد آلی، مرتبط با ذرات خاک عمل می‌کنند.

بین بُعد فرکتالی مدل‌های ریو و اسپوزیتو (D_nR) و تیلر و ویت کرافت (D_mT) با ویژگی‌های خاک همبستگی‌های قوی وجود داشت که نشانه‌ای از ماهیت فرکتالی ویژگی‌های خاک است که می‌تواند رفتار متغیرها در خاک را به خوبی تعیین کند. همبستگی ساده خطی بین D_mT و D_nR با درصد شن مثبت و معنی‌دار و با درصد رس، منفی و معنی‌دار شد. همچنین همبستگی ساده بین D_nR و درصد سیلت منفی و معنی‌دار گردید (جدول ۳). این نشان می‌دهد که عدد کمتر بُعد فرکتالی پایداری بیشتر خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد و ذرات شن پایداری خاکدانه‌ها را کم و درصد رس بیشتر، پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد. بُعد فرکتالی هم با استفاده از توزیع اندازه خاکدانه‌ها و هم با استفاده از توزیع ذرات محاسبه می‌گردد ولی باید دقت داشت که توزیع اندازه ذرات در بیشتر مطالعات برای مطالعه بافت خاک کاربرد دارد و به منظور برقراری ارتباط بین بُعد فرکتالی با پایداری خاکدانه‌ها باید از توزیع اندازه خاکدانه‌ها که مرتبط

کرده‌اند. نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده همبستگی زیاد و معنی‌دار بُعد فرکتالی با ویژگی‌های خاک است. اگر چه هر دو مدل فرکتالی استفاده شده تفاوت‌هایی را دارند ولی مدل ریو و اسپوزیتو رابطه تعداد-اندازه و مدل تیلر و ویت کرافت رابطه تعداد-جرم را شبیه‌سازی می‌کند، ولی هر دو مدل از هندسه فرکتالی تبعیت می‌کنند.

مقایسه مدل‌های فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها

مقایسه دو مدل فرکتالی ریو و اسپوزیتو و مدل تیلر و ویت کرافت با محاسبه معیارهای مجذور مربعات باقی‌مانده‌ها (RSS)، ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE)، میانگین خطاها (ME) و معیار اطلاعات آکایک (AIC)، انجام گردید.

بر اساس تخمین پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک با مدل‌های فرکتالی میزان بُعد فرکتالی کمتر بیانگر پایداری بیشتر خاکدانه‌ها می‌باشد. گولسر (۲۰) رابطه منفی D_mT با BD را گزارش کرده است. همبستگی بین D_nR و D_mT مثبت و معنی‌دار ($r=0/92$) گردید. گولسر (۲۰) نیز مقدار این نوع همبستگی را $0/973$ گزارش کرده است. هر چه ضریب همبستگی مزبور به یک نزدیکتر باشد مشابهت بیشتر دو مدل در شبیه‌سازی توزیع اندازه خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. همبستگی بین D_nR و AR منفی و معنی‌دار ($r=-0/75$) گردید. مشابه این پژوهش رابطه بین D_nR و AR توسط راسیاه و همکاران (۴۰) $r=-0/83$ و پرفکت و کی (۳۳) $r=-0/92$ گزارش شده است. در بیشتر موارد ضریب همبستگی D_n با ویژگی‌های خاک بیشتر از D_m به‌دست آمد که محققینی از جمله فیلگویرا و همکاران (۱۶) نیز حساسیت بیشتر D_n نسبت به D_m را در مقابل عملیات مدیریتی تأیید

جدول ۳- ضریب همبستگی ساده بین متغیرهای اندازه‌گیری شده و بُعد فرکتالی

Table 3- Simple correlation coefficient between measured variables and fractal dimension

	MW D	GM D	AR	D_nR	D_mT	EC	pH	SP	TN V	OC	Gp	Clay	Silt	Sand	B D
MW D	1														
GMD	0.96**	1													
AR	-0.83**	-0.90**	1												
D_nR	-0.83**	-0.92**	0.99*	1											
D_mT	-0.75**	-0.90**	0.89*	0.91*	1										
EC	0.29	0.3	-0.19	-0.22	-0.25	1									
pH	0.28	0.27	-0.35	-0.33	-0.25	0.32	1								
SP	-0.43*	-0.33	0.44*	0.41*	0.14	0.26	-0.05	1							
TNV	-0.30	-0.32	0.36	0.39*	0.31	0.21	0.11	0.23	1						
OC	-	-0.78**	0.95*	0.93*	0.74*	-0.16	-0.34	0.57*	0.40*	1					
Gp	0.15	0.22	-0.18	-0.21	-0.24	0.18	-0.01	-0.005	-0.31	-0.14	1				
Clay	0.20	0.32	-0.36	-0.39*	-0.47*	0.46*	0.42*	0.40*	-0.20	-0.17	0.51*	1			
Silt	0.48**	0.42*	-0.05*	-0.46*	-0.28	-0.34	-0.10	0.77*	-0.22	0.54*	-0.18	-0.6**	1		
Sand	-0.65**	-0.73**	0.82*	0.83*	0.78*	-0.27	-0.41*	0.15	0.41*	0.77*	-0.43**	-0.7**	-0.16	1	
BD	0.64**	0.69*	-0.88**	-0.85**	-0.69**	0.13	0.31	-0.53**	-0.36	-0.93**	0.08	0.14	0.54*	-0.6**	1

** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد EC: قابلیت هدایت الکتریکی (ds/m)، SP: درصد اشباع، T.N.V: درصد مواد خنثی شونده، pH: واکنش گل اشباع، OC: درصد کربن آلی، Gp: درصد گچ، Clay: درصد رس، Silt: درصد سیلت، Sand: درصد شن، BD: جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)، AR: پارامتر فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو، D_nR : بعد فرکتالی مدل ریو و اسپوزیتو، D_mT : بعد فرکتالی مدل تیلر و ویت کرافت.

جدول ۴- مقایسه میانگین معیارهای ارزیابی دقت مدل‌های فرکتالی
Table 4-Average comparison of accuracy evaluation criteria of fractal models

نام مدل Model name	مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها RSS	ضریب تبیین R ²	ریشه میانگین مربعات خطاها RMSE	میانگین خطاها ME	معیار اطلاعات آکایک AIC
ریو و اسپوزیتو Riue and Sposito	0.322 ^a	0.41 ^a	9349.29 ^a	-5188.35 ^a	76.71 ^a
تیلر و ویت‌کرافت Taylor and Wheatcraft	0.322 ^a	0.54 ^b	54.94 ^a	15.87 ^a	57.08 ^b

بزرگتر از ۳ شدن بُعد فرکتالی می‌شود. روش‌های اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاکدانه‌ها نیز روش دقیقی نیست (۱۰) و ممکن است در کاربرد روش مزبور خطا ایجاد کرده و موجب بُعد فرکتالی بزرگتر از ۳ شود.

ساختمان خاک نقش زیادی در فرآیندها و عملکرد خاک دارد ولی به‌صورت کیفی نمی‌تواند در این مدل‌ها نقش آفرینی کند و این تلاش علمی نیاز به تحقیقات تکمیلی دارد تا در آینده این مهم عملی شود در این پژوهش نیز نتایج ارزشمندی حاصل شده است که بسیار پراهمیت می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

معیارهای تجربی میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها، ابزارهای ساده و متداولی در بیان پایداری خاکدانه‌ها محسوب می‌شوند که در این پژوهش معیارهای مزبور همبستگی معنی‌داری را با متغیرهای خاکی داشتند که در این بین همبستگی آن‌ها با متغیرهای پایای خاک پررنگ‌تر بود. به‌طور کلی MWD و GMD با ماده آلی همبستگی منفی و با جرم مخصوص ظاهری خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. علت این نتیجه غیر منتظره، استثناء بودن راسته هیستوسول می‌باشد که ماده آلی بسیار زیاد و شرایط حاکم بر خاکدانه‌های آن متفاوت با سایر راسته‌های خاک بود.

بُعد فرکتالی نمونه‌های خاک در راسته‌های مختلف به استثناء راسته هیستوسول (بزرگتر از ۳) در محدوده عدد ۳ به‌دست آمد که منطقی و مورد قبول می‌باشد. بُعد فرکتالی مدل‌های ریو و اسپوزیتو و تیلر و ویت‌کرافت همبستگی منفی و معنی‌داری را با MWD، GMD، درصد رس و BD و همبستگی مثبت و معنی‌داری را با درصد شن داشتند. رابطه عکس شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها با بُعد فرکتالی تأکیدی بر کاهش بُعد فرکتالی با افزایش پایداری خاکدانه‌ها در راسته‌های مختلف می‌باشد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که بررسی و مطالعه ساختمان خاک و شاخص‌های مرتبط با آن در راسته‌های مختلف با بُعد فرکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌تواند مفید واقع گردد. بررسی ضرایب تبیین (R²) و میانگین خطاها (ME)، ریشه

مقایسه این دو مدل آزادی عمل و انتخاب آن را تسهیل می‌کند. بدین منظور پس از محاسبه بُعد فرکتالی هر مدل مقادیر جرم یا تعداد خاکدانه‌ها در کلاس‌های مختلف برای نمونه‌های خاک تخمین زده شد و معیارهای ذکر شده در مقایسه با مقادیر محاسبه شده تخمین زده شده بررسی و مقایسه میانگین انجام گردید (جدول ۴).

ویژگی‌های EC، pH و گچ بر برخی از ویژگی‌های خاک تاثیر دارند و این ویژگی‌ها از عوامل موثر بر ساختمان و پایداری خاکدانه‌ها در برخی از راسته‌های خاک به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند (جدول ۳).

معیار AIC کیفیت برازش مدل را نشان می‌دهد و مقادیر بالای آن خطای بیشتر مدل را نشان می‌دهد (۱). معیار RSS نیز تخمین مستقیمی از خطای مدل را نشان می‌دهد و بالا بودن مقادیر آن دلیل بر دقت پایین مدل است.

با بررسی معیارهای محاسبه شده برای مدل‌های مختلف فرکتالی (جدول ۴) مشخص شد که معیارهای RSS، R²، RMSE، ME و AIC به‌دست آمده برای مدل‌های فرکتالی در مواردی اختلاف معنی‌داری دارند. بیشترین R² از مدل تیلر و ویت‌کرافت به‌دست آمد. کمترین مقادیر RMSE، ME و AIC از مدل تیلر و ویت‌کرافت به‌دست آمد. از طرفی همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان داد، بُعد فرکتالی محاسبه شده با مدل ریو و اسپوزیتو برای بعضی از نمونه‌ها بزرگتر از ۳ گردید که از دو دیدگاه قابل بررسی است. یکی این که مدل مزبور سازگاری نداشته و دیگر این که حساسیت مدل بالاتر بوده و نشان می‌دهد که نمونه‌های مزبور باید با مدل‌های دیگر مثلاً با مدل‌های چندبُعدی و سایر مدل‌ها بررسی شود.

بنابراین به‌نظر می‌رسد توصیف سیستم پیچیده‌ای مانند توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک با یک مدل فرکتالی کافی نیست و استفاده از مدل‌های چندفرکتالی یا مدل‌هایی که دو یا بیش از دو بُعد فرکتالی دارند مانند مدل میلان و همکاران (۲۷) که برای توزیع اندازه ذرات استفاده شده مورد نیاز می‌باشد. از طرفی بیشتر فرآیندهای طبیعی دارای عوامل تصادفی آماری و قطعی می‌باشند و ساختار مدل‌های تک‌فرکتالی پتانسیل محدودی برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده دارد (۳۴). بنابراین چندفرکتالی بودن توزیع اندازه خاکدانه‌ها باعث

شاخص مرکزی مانند میانگین مقایسه می‌کنند، توصیه می‌گردد. در این پژوهش به‌جای بیان ساختمان خاک به‌صورت کیفی (مکعبی، دانه‌ای و ...) مقادیر کمی برای ساختمان خاک در افق‌های مختلف تعیین شد. تحقیقات تکمیلی کامل‌تری با تعداد نمونه بیشتر و در تنوعی از راسه‌های خاک باید انجام شود تا نتایج آن در مدل‌های کاربردی برای بیان فرآیندهای خاک و مدل‌سازی ارزیابی و استفاده شود.

میانگین مربعات خطاها (RMSE)، مجذور مربعات باقی‌مانده‌ها (RSS)، و آماره AIC نشان داد که مدل تیلر و ویت کرافت در توصیف و کمی نمودن ساختمان خاک، از صحت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین کاربرد مدل‌های مزبور و به‌ویژه مدل تیلر و ویت کرافت برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها مورد تأیید و تأکید می‌باشد. از آنجا که تئوری فرکتالی در مطالعه تغییرپذیری یک متغیر، توزیع متغیر را در مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد، لذا استفاده از این روش به جای روش‌های کلاسیک آماری که مقادیر داده‌ها را نسبت به یک

منابع

1. Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control AC*, 19: 716-723.
2. Ataei A., Gorgi, M. and Parvizi, Y. 2014. Evaluation of the suitability of fractal dimension of soil aggregates in assessing different soil management practices. *Iranian Journal of Soil Research*, 28: 701-712. (in Persian with English abstract).
3. Bayat H., Neyshabouri M.R., Mohammadi K. and Narimanzadeh, N. 2011. Estimating water retention with pedotransfer functions using multi-objective group method of data handling and ANNs. *Pedosphere*, 21: 107-114.
4. Beare M.H., Hendrix P.F. and Coleman D.C. 1994. Water- stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58: 777-786.
5. Belaid H. and Habaieb H. 2015. Soil aggregate stability in a Tunisian semi-arid environment with reference to fractal analysis. *Journal of Soil Science Environment Management*, 6(2): 16-23.
6. Boix-Fayos C., Calvo-Cases A. and Imeson A.C. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Journal of Catena*, 44: 47- 67.
7. Bronik C.J. and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.
8. Cambardella C.A. 2006. Aggregation and organic matter. P52-55, In: Lal R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
9. Caruso T., Barto E.K., Siddiky M.R.K., Smigelski J. and Rillig M.C. 2011. Are power laws that estimate fractal dimension a good descriptor of soil structure and its link to soil biological properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 359-366.
10. Chepil W.S. 1950. Methods of estimating apparent density of discrete soil grains. *Soil Science*, 70: 351-362.
11. Dahiya I.S., Richter J. and Malik R.S. 1984. Soil spatial variability: A review. *International Tropical Agriculture*, 77: 1-102.
12. Díaz-Zorita M., Perfect E., Grove J.H. 2002. Descriptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research*, 64: 3-22.
13. Ding Q. and Ding W. 2007. Comparing stress wavelets with fragment fractals for soil structure quantification. *Soil and Tillage Research*, 93: 316-323.
14. Duhour A., Costa C., Momoa F., Falco L. and Malacalza L. 2009. Response of earthworm communities to soil disturbance: Fractal dimension of soil and species' rank-abundance curves. *Applied Soil Ecology*, 43: 83-88.
15. Eghball B., Mielke L.N., Calvo G.A. and Wilhelm W.W. 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods and crop sequences. *Soil Science Society American Journal*, 57: 1337-1341.
16. Filgueira R.R., Fournier L.L., Sarli G.O., Aagon A. and Rawals, W.J. 1999. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a Phaeozem in central Argentina. *Soil and Tillage Research*, 52: 217-222.
17. Gardner W.R. 1956. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Science American Proceeding*, 20: 151-153.
18. Gee G.W. and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. P383-411, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part I, 2d Madison, WI. American Society Agronomy.
19. Grossman R.B. and Reinsch T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. P201-228, In: Warren, A.D. (ed.).

- Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society American Inc.
20. Gulser C. 2006. Effect of forage cropping treatments on soil structure relationships with fractal dimensions. *Geoderma*, 131: 33–44.
 21. Huang G. and Zhang R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127: 52-61.
 22. Karami A., Homaeae M., Afzalnia S., Ruhipour H. and Basirat S. 2012. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agricultural Ecosystem and Environment*, 148: 22–28.
 23. Kutlu T., Ersahin S. and Yetgin B. 2008. Relations between solid fractal dimension and some physical properties of soils formed over alluvial and colluvial deposits. *Journal of Food Agricultural Environment*, 6: 45-449.
 24. Larney F.J. 2008. Dry-aggregate size distribution. P821-83, In: Carter M.R., Gregorich E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science, CRC Press, Boca Raton, FL.
 25. Mazurak A.P. 1950. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. *Soil Science*, 69: 135–148.
 26. McLean E.O. 1988. Soil pH and lime requirement. PP199-224, In: Page A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part, American Society of Agronomy, Soil Science Society America, Madison, Wis.
 27. Millan H., Gonzalez-Posada M., Aguilar M., Dominguez J. and Cespedes L. 2003. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions. *Geoderma*, 117: 117-128.
 28. Nadler A., Perfect E. and Kay B.D. 1996. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregate. *American Journal of Soil Science Society*, 60: 555-561.
 29. Olawale O.J., Abu S.T. and Dorcas, O.O. 2016. Evaluation of soil aggregate stability under long term land management system. *International Journal of Plant and Soil Science*, 9(2): 1-7.
 30. Page A.L., Miller R.H, and Keeney, D.R. 1982. *Methods of soil analysis, Part II, Physical properties*, ASA, Soil Science Society of America, Madison, WI.
 31. Parent L.E., Parent S.E., Kätterer T. and Egozcue J.J. 2011. Fractal and compositional analysis of soil aggregation. *Proceedings of the 4th International Workshop on Compositional Data Analysis*. P9-13.
 32. Perfect E. and Blevnis R.L. 1997. Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment. *Soil Science Society American Journal*, 61: 896-900.
 33. Perfect E. and Kay B.D. 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Science Society American Journal*, 55: 1552-1558.
 34. Perfect E., Kay B.D. and Rasiah V. 1993. Multifractal model for soil aggregate fragmentation. *Soil Science Society American Journal*, 57: 896-900.
 35. Perfect E., Kenst A.B., Diaz-Zorita M. and Grove J.H. 2004. Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters. *Soil Science Society American Journal*, 68: 1177–1184.
 36. Perfect E., Pachepsky Y. and Martin M.A. 2009. Fractal and multiracial models applied to porous media. *Vadose Zone Journal*, 7: 174–176.
 37. Perfect E., Rasiah V. and Kay B.D. 1992. Fractal dimension of soil aggregate- size distribution calculated by number and mass. *Soil Science Society American Journal*, 56: 1407-1409.
 38. Pirmoradian N., Sepaskhah A.R. and Hajabbasi M.A. 2005. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystem Engineering*, 90: 227-234.
 39. Puri A.M. and Puri B.R. 1939. Physical characteristics of soil. II. Expressing mechanical analysis and state of aggregation of soil values. *Soil Science*, 33: 141-163.
 40. Rasiah 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.
 41. Rasiah V., Kay B.D. and Perfect E. 1993. New mass – based model for estimating fractal dimension of soil aggregates. *Soil Science Society American Journal*, 57: 891-895.
 42. Rieu M. and Sposito G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II. Applications. *Soil Science Society American Journal*, 55: 1239-1244.
 43. Soil Survey Division Staff. 2010. *Soil Survey Manual United States Department of Agriculture*, Washington. P97-123.
 44. Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Leoppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston G.T. and summer M.E. 1996. *Methods of soil analysis*. Madison. Soil Science Society of America.
 45. Su Y.Z., Zhao H.L., Zhao W.Z. and Zhang T.H. 2004. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma*, 122: 43–49.
 46. Tyler S.W. and Wheatcraft S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society American Journal*, 56: 362-369.

47. vanBavel C.H.M. 1949. Mean weight-diameter of soil aggregation as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society American Journal*, 14: 20–23.
48. Walczak R.T., MorenoF., Sławinski C., Fernandez E. and Arru J.L. 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*, 329: 527–533.
49. Wang D., Fu B., Zhao 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.
50. Zicheng Z., Shuqin H. and Tingxuan L. 2011. Fractal dimensions of soil structure and soil anti-erodibility under different land use patterns. *African Journal of Agricultural Research*, 6: 5496-5504.

Application of Fractal Theory to Quantify Structure from Some Soil Orders in Fars Province

A. Karami¹-R. Zara²- V.A. Jahandideh Mahjen Abadi³

Received: 19-09-2016

Accepted: 01-01-2017

Introduction: Fractal geometry concepts have been widely applied as a useful tool to describe complex natural phenomena, in particular, for a better understanding of soil physical systems. However, limited information is available on the fractal characteristics of soil properties or soil aggregation. A soil aggregate is made of closely packed sand, silt, clay and organic particles building up soil structure. Soil aggregation is a soil quality index integrating the chemical, physical, and biological processes involved in the genesis of soil structure. Soil structure and its stability are important issues for many agronomic and environmental processes. Thus, quantitative description of soil structure is very important. Soil forming factors in different soils (various orders) and forms affect the soil structure formation. Characterizing aggregate size distribution for different soil orders using fractal theory is necessary for evaluating the impact of soil forming factors on soil structure and quantifying the relationship between fractal dimension and other important soil properties. Therefore, the aims of this research were quantifying the structure of different soil orders using fractal geometry, mean weight diameter of aggregates (MWD) and geometric mean diameter of aggregates (GMD). In addition, MWD and GMD indices and fractal parameters of soil aggregate size distribution were compared to evaluate soil structure and determine the relationship between fractal parameters with MWD, GMD and other soil properties.

Materials and Methods: Fractal models which simulate soil structure are also used to better understand soil behaviors. Aggregate size distribution is determined by sieving a fixed amount of soil mass under mechanical stress and is commonly synthesized by the MWD, GMD and fractal dimensions such as the fragmentation fractal dimensions. Therefore, aggregate size distribution and its stability variation were evaluated using some fractal models and MWD and GMD (empirically indices). In the current study, the original data were obtained from analysis of diagnostic horizons of seven important soil orders located in Fars Province in the Southern Iran. Soil samples were collected from diagnostic horizons of seven soil orders including Entisols, Vertisols, Aridisols, Mollisols, Alfisols, Histosols and Inceptisols. The measured physico-chemical properties of soil were aggregate size distribution, soil particle size percentage (sand, silt, and clay), saturation percentage (SP), organic carbon (OC), pH, calcium carbonate equivalent (TNV), gypsum content, soil electrical conductivity (EC) and soil bulk density (BD). The MWD and GMD indices, the fractal dimensions and fractal parameters of aggregates were then calculated. Relationships between soil properties with MWD, GMD and the fractal dimension were also determined.

Results and Discussion: The results showed that there was a significant correlation between fractal dimension of Riue and Sposito and Taylor and Wheatcraft models and soil aggregate stability indices (MWD and GMD indices of aggregates) with the other soil characteristics. This correlation between fractal parameters with organic matter, bulk density, clay and sand percentage was stronger than other soil properties. There was a significant and negative correlation ($p < 0.01$) between fractal dimension of Riue and Sposito and Taylor and Wheatcraft models with mean weight diameter of aggregates and geometric mean diameter of aggregates. Inverse correlation between fractal dimension and aggregate stability indices illustrated that lower fractal dimensions were calculated for the soils with more stable aggregates which have the highest mean weight diameter of aggregates and geometric mean diameter of aggregates. Subsequently, the fractal dimension of aggregates could reflect the aggregate stability factors. The values of coefficient of determination (R^2) and mean error (ME), root mean square error (RMSE), residual sum of squares (RSS), mean square of non-fitted (Sr^2) and Akaike (AIC) statistical criteria indicated that Taylor and Wheatcraft model had the better performance. Although larger fractal dimensions were estimated by Riue and Sposito model which can be explained by the

1 - Assistant Professor of Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran

(* - Corresponding Author Email: ad.karami@areeo.ac.ir)

2 - M.Sc. Graduated, Department of Soil Science, Fars Science and Research Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3 - Ph. D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

great model sensitivity, this model overall performed well.

Conclusion: The results indicated that fractal theory can be used to characterize soil structure at different soil orders and fractal dimensions of soil aggregate seems to be more effective in this regard, except for Histosols. Fractal dimension can be estimated using some easily available soil properties. Fractal theory can be applied to characterize and quantify soil structure in different soil orders of Fars Province.

Keywords: Aggregates size distribution, Aggregates stability, Fractal models, Soil orders, Soil structure