

تحلیل مالتی‌فرکتالی بودن توزیع اندازه ذرات خاک و تأثیر پوسته‌های زیستی بر آن

جلیل کاکه، علی‌اصغر ذوالفقاری¹ و منوچهر گرجی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران؛ Jalil.kake@alumni.ut.ac.ir

استادیار گروه مناطق خشک دانشکده کویر شناسی دانشگاه سمنان؛ Ali_zol2000@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی علوم خاک - پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران؛ mgorji@ut.ac.ir

دریافت: 92/8/27 و پذیرش: 92/11/21

چکیده

توزیع اندازه ذرات خاک، یکی از خصوصیات فیزیکی مهم خاک است که بسیاری از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و زیستی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر خصوصیات مانند نفوذپذیری خاک، تغییر کاربری اراضی و فرسایش خاک، پوسته‌های زیستی نیز سبب تغییر توزیع اندازه ذرات خاک‌ها می‌شوند اگرچه ممکن است که سبب تغییر در کلاس بافتی خاک نشوند. اندازه‌گیری و تحلیل مالتی فرکتال یکی از ابزارهای مهم در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پوسته‌های زیستی بر پارامترهای مالتی‌فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه انجام شد. در این مطالعه نمونه‌برداری از چهار ناحیه خاک‌های دارای و بدون پوسته زیستی و از دو عمق 0-5 و 5-15 سانتی‌متری مراتع قره‌قیر واقع در شمال شهرستان آق‌قلا، در استان گلستان انجام شد. توزیع اندازه ذرات 16 خاک مورد مطالعه با استفاده از روش هیدرومتر تعیین شد. مقایسه منحنی‌های توان جرم $(\tau(q))$ و خط تک‌فرکتالی شبیه‌سازی شده نشان داد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه دارای رفتار مالتی‌فرکتالی می‌باشد. در تمامی خاک‌های مورد مطالعه تغییرات ابعاد فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک‌ها در مقادیر مختلف گشتاور (q) دارای روند سیگموئیدی بود. در این مطالعه همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح 1 درصد) بین ابعاد فرکتال $D_{0.5}$ (بعد فرکتال در $q=0.5$)، D_1 (بعد فرکتال در $q=1$)، $D_{1.5}$ (بعد فرکتال در $q=1.5$)، D_2 (بعد فرکتال در $q=2$) و $D_{2.5}$ (بعد فرکتال در $q=2.5$) با درصد رس مشاهده شد در حالی که همبستگی بین درصد شن و این ابعاد منفی و در سطح 1 درصد معنی‌دار بود. شاخص (D_0-D_2) برای بررسی درجه مالتی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک‌ها استفاده شد. بیشترین مقدار متوسط این شاخص در توزیع اندازه ذرات خاک‌های 0-5 سانتی‌متری دارای پوسته (0/295) و کمترین مقدار متوسط این شاخص در لایه 5-15 سانتی‌متری خاک‌های بدون پوسته (0/240) مشاهده شد. این نتایج نشان داد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارای پوسته زیستی به نسبت خاک‌های بدون پوسته دارای ناهمگنی بیشتری می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: طیف مالتی فرکتال، ویژگی‌های فیزیکی خاک، ابعاد فرکتالی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: سمنان، میدان سعدی، خیابان مولوی، دانشکده کویر شناسی دانشگاه سمنان، گروه مدیریت مناطق خشک.

مقدمه

پوسته‌های زیستی خاک¹ ناشی از تجمع ذرات خاک و موجودات زنده‌ای از قبیل سیانوباکتری، جلبک، قارچ، گل‌سنگ‌ها و خزها در نسبت‌های مختلف هستند که بر روی سطح زمین یا در داخل چند میلی‌متر فوقانی خاک زندگی می‌کنند (بلنپ و همکاران، 2001). ذرات پراکنده خاک به واسطه حضور و فعالیت این موجودات زنده به همدیگر متصل می‌شوند و این پوسته‌ها به عنوان یک لایه منسجم سطح زمین را می‌پوشانند (بلنپ و همکاران، 2001).

پوسته‌های زیستی بسیاری از خصوصیات سطح خاک را که بر الگوهای هیدرولوژی موضعی مؤثر هستند، که اکثر این ویژگی‌ها سبب افزایش نفوذپذیری آب در خاک می‌شود را تحت تأثیر قرار می‌دهند (بلنپ، 2006). پوسته‌های زیستی نقش مهمی در حفاظت خاک در برابر فرسایش آبی و بادی (بلنپ و گیلیت، 1998؛ فانگ و همکاران، 2007)، ایفا می‌کنند که البته لگدکوبی و حذف پوسته‌های زیستی میزان فرسایش را افزایش می‌دهد.

با توجه به افزایش نفوذپذیری و کنترل فرسایش خاک، در خاک‌های دارای پوسته زیستی انتظار می‌رود که توزیع اندازه ذرات خاک که تفسیر کامل‌تری از بافت خاک می‌باشد، در خاک‌های دارا و بدون پوسته زیستی تغییر یابد اگرچه ممکن است که کلاس بافتی خاک‌های دارا و بدون پوسته زیستی هیچ تغییری نداشته باشد. به عنوان مثال چامیزو و همکاران (2012)، با بررسی خاک دو لایه 0-1 و 1-5 سانتی‌متری زیر پوسته‌های زیستی در دو منطقه مجزا در اسپانیا، تفاوت معنی‌داری در بافت خاک در بین لایه‌های فوقانی و عمقی مشاهده نکردند.

به منظور برقراری ارتباط بین توزیع اندازه ذرات خاک و پوسته‌های زیستی، لازم است که در ابتدا توزیع اندازه ذرات خاک به صورت کمی و با استفاده از معادلاتی توصیف گردد. توابع توانی (نظیر مدل‌های فرکتالی) از معادلاتی هستند که قادر به کمی کردن منحنی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشند. مطالعات زیادی نشان داده است که استفاده از یک بعد فرکتال² برای توصیف توزیع اندازه ذرات در تمامی اندازه ذرات کافی نیست (تیرگرسلطانی و همکاران، 1391). به عنوان مثال فیلگوئرا و همکاران (2003) و تیرگرسلطانی و همکاران (1391) نشان دادند که 2 یا 3 بعد فرکتال برای توصیف توزیع اندازه ذرات لازم است. به عبارت دیگر نتایج این محققین

نشان داد که رفتار توزیع اندازه ذرات خاک به رفتار مالی فرکتالی³ شبیه بوده لذا لازم است که بر اساس طیف مالی فرکتالی که جزئیات بیشتری از توزیع اندازه ذرات خاک را در اختیار قرار می‌دهد، توصیف شود. پس‌داس و همکاران (2001) بیان داشتند که توزیع اندازه ذرات خاک دارای رفتار مالی فرکتالی می‌باشد. مترو (2005)، از آنالیز مالی فرکتالی برای بررسی خصوصیت توزیع اندازه ذرات خاک استفاده نمود. این محقق بیان داشت که حاصل تقسیم بعد فرکتال در گشتاور یکم (D_1) به بعد فرکتال در گشتاور صفرم (D_0) شاخص مناسبی برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. در صورتی که D_0 عددی متفاوت از یک باشد نتایج زیر را می‌توان از شاخص D_1/D_0 بدست آورد. اگر D_1/D_0 برابر یا نزدیک به یک باشد نشان دهنده وجود یک مجموعه‌ای از ابعاد فرکتالی مشابه می‌باشد.

به عبارت دیگر این نتایج نشان می‌دهد که درصد فراوانی ذرات خاک (توزیع اندازه ذرات خاک) به صورت منظم در اندازه‌های مختلف پراکنده شده‌اند در حالی که اگر این مقدار نزدیک به صفر باشد نشان دهنده درصد فراوانی ذراتی است که بیشتر آنها در اندازه‌های کوچک تمرکز حاصل کرده‌اند. ونگ و همکاران (2008) تأثیر تغییر کاربری اراضی را بر خصوصیات مالی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک مورد ارزیابی قرار دادند و بیان داشتند که ابعاد فرکتالی شاخص مناسبی برای توصیف تغییر کاربری اراضی می‌باشند. آنها همبستگی بین D_1 را با درصد رس و سیلت مثبت و معنی‌دار و همبستگی بین شن و D_1 را منفی گزارش کردند. پاز- فرریر و همکاران (2010) از ابعاد فرکتال برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک‌هایی با پوشش‌های گیاهی متفاوت اما دارای کلاس بافتی یکسان، استفاده کردند. این محققین نشان دادند که پوشش‌های گیاهی متفاوت اگرچه سبب تغییر کلاس بافتی خاک نمی‌شوند اما طیف مالی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

پوسته‌های زیستی نیز ممکن است که سبب تغییر کلاس بافتی خاک نشوند اما با توجه به تأثیری که بر روی خصوصیات هیدرولیکی خاک دارند می‌توانند سبب تغییر در توزیع اندازه ذرات خاک شوند. بنابراین برای استفاده از کلاس بافتی خاک برای بررسی تأثیر پوسته‌های زیستی امکان‌پذیر نمی‌باشد و لازم است که شاخص‌هایی توصیف‌کننده توزیع اندازه ذرات خاک مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات صورت گرفته نشان داده که ابعاد فرکتال

¹ Biological soil crusts (BSCs)

² Single fractal dimension

³ Multifractal

پراکنش (هگزامتافسفات سدیم 5%) تیمار شدند. به منظور تعیین جرم و تفکیک اندازه‌های ذرات شن، نمونه‌های تیمار شده از الک 53 میکرون عبور داده شدند و مواد زیر الک نیز به طور کامل به مزور یک لیتری منتقل گردیدند. نمونه‌های باقی مانده بر روی الک، پس از خشک شدن، روی سری غربال‌های 1، 0/5، 0/25، و 0/15 میلی‌متر قرار گرفتند تا جرم این ذرات در هر یک از بخش‌های اندازه‌ای مذکور به طور جداگانه به دست آید. جرم ذرات موجود در مزور یک لیتری نیز در هر بخش اندازه‌ای به روش ته‌نشینی و با استفاده از هیدرومتر بایکاس (152 H) اندازه‌گیری و محاسبه شدند. قرائت هیدرومتر در زمان‌های 30، 20، 10، 5، 2، 1، 0/3، 0/2، 0/1، 0/05، 0/02، 0/01 و 24 ساعت به همراه اندازه‌گیری دما صورت گرفت. داده‌های جرم در قرائت‌های هیدرومتر به صورت درصد تجمعی جرم ذرات کوچک‌تر از یک اندازه معین به دست آمدند.

آزمایشات نفوذ با استفاده از روش استوانه‌های مضاعف انجام گردید (راینولدز و همکاران، 1986). آزمایشات نفوذپذیری در هر ناحیه و در زمین‌های پوشیده از پوسته‌های زیستی و فاقد آن در 3 تکرار در شرایط رطوبتی ظرفیت مزرعه‌ای انجام گردید. قرائت‌ها با فواصل زمانی 1، 2، 5 و 10 دقیقه، و جمعاً 100 دقیقه، صورت گرفت و افت آب در حلقه داخلی اندازه‌گیری شد. در این آزمایش از آب با هدایت الکتریکی 0/41 دسی‌زیمنس بر متر استفاده گردید.

فرسایش‌پذیری خاک یکی از عوامل شش‌گانه مؤثر در فرسایش آبی در رابطه جهانی فرسایش خاک است. این عامل نشان دهنده سهولت جدا شدن ذرات در اثر ضربه قطرات باران بوده که طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (ویشمایر و همکاران 1971):

(1)

$$100K=2.1M^{1.4} \times 10^{-4}(12-\%OM)+3.25(5-2)+2.5(P-3)$$

K عامل فرسایش‌پذیری خاک (برحسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر)، OM درصد ماده آلی خاک، S کد ساختمان خاک، P کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک و M برابر (درصد رس - 100) × (درصد سیلت + شن خیلی ریز) است. مقدار کربن آلی خاک به روش والکلی - بلک تعیین گردید (نلسون و سومر، 1986).

د) برازش مدل بر داده‌های توزیع اندازه ذرات و محاسبه ابعاد فرکتال

معمولاً استفاده از داده‌های اولیه (داده‌های خام) توزیع اندازه ذرات خاک در تحلیل مالٹی فرکتالی سبب از بین رفتن بسیاری از اطلاعات مربوط به این آنالیز خواهد

می‌توانند شاخص‌های مناسبی در بررسی اثر تیمارهای مختلفی از قبیل نوع پوشش گیاهی که در آنها کلاس بافتی خاک تغییر نمی‌کند اما توزیع اندازه ذرات خاک تغییر می‌یابد، باشند (پاز - فرریر و همکاران 2010). این شرایط مشابه تأثیر پوسته‌های زیستی بر بافت و توزیع اندازه ذرات خاک است. لذا در تحقیق حاضر، در ابتدا رفتار مالٹی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر پوسته‌های زیستی بر توزیع اندازه ذرات و ابعاد فرکتالی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس ارتباط بین شاخص‌هایی از قبیل فرسایش‌پذیری خاک، درصد رس و شن با ابعاد فرکتال نیز بدست آمد. در نهایت تأثیر پوسته‌های زیستی بر خصوصیات خاک مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در مراتع قره‌قیر واقع در شمال شهرستان آق‌قلا در استان گلستان انجام شد. مختصات جغرافیایی منطقه عبارتست از 54 درجه و 32 دقیقه تا 54 درجه و 40 دقیقه طول شرقی، 37 درجه و 18 دقیقه تا 37 درجه و 22 دقیقه عرض شمال بود. مراتع قره‌قیر از مجموعه‌ای از تپه‌های لسی به مساحت تقریبی 8560 هکتار تشکیل یافته است، وجه تمایز این مراتع از مناطق شورزار اطراف وجود پوسته‌های زیستی (با غالبیت خزه و گل‌سنگ) همراه با گیاهان آوندی می‌باشد. بر اساس آمار 10 سال اخیر (90-1380) ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه، میزان متوسط بارش سالانه 273 میلی‌متر می‌باشد. بیشترین مقدار بارندگی در ماه‌های بهمن و اسفند و کمترین آن در تیر و مرداد است. بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژ، منطقه دارای اقلیم خشک و سرد است (طویلی، 1383).

ب) نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر پوسته‌های زیستی بر خصوصیات خاک، از کل منطقه مورد نظر چهار ناحیه که گویای شرایط کلی منطقه بوده و از لحاظ اقلیم، زمین‌شناسی و توپوگرافی یکسان بودند، جهت انجام نمونه‌برداری انتخاب گردید. در هر یک از این نواحی چهارگانه در قسمت‌های دارای پوسته و فاقد آن در دو عمق 0-5 و 5-15 سانتی‌متری و در هر عمق در 3 تکرار نمونه‌برداری صورت گرفت.

ج) تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

توزیع اندازه ذرات به روش گی و بادر (1986) و براساس قانون استوکز اندازه‌گیری شد. در ابتدا مقدار 40 گرم از نمونه خاک کوچکتر از 2 میلی‌متر با محلول

آمد. در انتها فاصله بین بزرگترین و کوچکترین مقدار φ (4/26) به 61 قسمت مساوی تقسیم شد.

به طور معمول آنالیز مالی فرکتال در مقیاس‌های¹ (ε) با اندازه‌های متفاوت انجام می‌گیرد. لذا برای تعیین این مقیاس‌ها می‌توان فاصله بین بزرگترین و کوچکترین مقدار φ را به مقیاس‌های متفاوت که به صورت تابعی از اعداد، در مبنای دو می‌باشند، و با استفاده از معادله زیر تعیین نمود (مترو 2005، ونگ و همکاران 2008، پاز-فرریر و همکاران 2010).

$$\varepsilon = L2^{-k} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

که L فاصله بین بزرگترین و کوچکترین φ و k عدد صحیح می‌باشد. در این مطالعه مقادیر 1، 2، 3 و 4 برای k در نظر گرفته شد. بنابراین فاصله بین بزرگترین و کوچکترین ذره (L) به 4 مقیاس مختلف تقسیم شد. در هر مقیاس تعداد داده‌های اندازه‌گیری ($N(\varepsilon)$) شده (تعداد داده‌هایی که در آن نسبت تجمعی ذرات محاسبه شده است) برابر است با:

$$N(\varepsilon) = 2^k \quad (6)$$

تحقیقات نشان داده که گشتاور q ام (گشتاور نشان دهنده توان در معادلات مورد استفاده می‌باشد که برابر اعداد مثبت و منفی است) متغیر اندازه‌گیری و نرمال شده $(\mu(q, \varepsilon))$ ، با تغییر اندازه مقیاس (ε) و بر اساس معادله زیر تغییر می‌کند (مترو 2005، بیسواز و همکاران 2012).

$$\mu_i(q, \varepsilon) = \frac{[p_i(\varepsilon)]^q}{\sum_i [p_i(\varepsilon)]^q} \quad (7)$$

$P_i(\varepsilon)$ احتمال وجود متغیر اندازه‌گیری شده در i امین اندازه‌گیری از مقیاس ε می‌باشد که از حاصل تقسیم مقدار متغیر در i امین اندازه‌گیری بر مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در تمامی فاصله L (در تمامی اندازه‌ها) بدست می‌آید. q نشان دهنده گشتاور بوده که مقادیر متفاوتی را اختیار می‌کند. در این مطالعه q بین 10- الی 10 و با فاصله 0/5 متغیر بود.

رابطه بین ابعاد فرکتال و متغیر اندازه‌گیری و نرمال شده (μ) در مقادیر متفاوت q و در مقیاس‌های مختلف به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$D(q) \approx \frac{1}{q-1} \frac{\log[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon)^q]}{\log \varepsilon} \quad q \neq 1$$

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \log \mu_i(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad q = 1 \quad (9)$$

شد (مترو 2005). منابع مختلف بیان داشته‌اند که فواصل اندازه‌گیری ذرات اولیه خاک بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که مقدار لگاریتم حاصل تقسیم اندازه ذره در $i+1$ ام قسمت به اندازه ذره در i ام قسمت ($\log(\frac{x_{i+1}}{x_i})$) همواره برابر با عدد ثابتی باشد (مترو 2005، ونگ و همکاران 2008). همچنین این منابع بیان داشتند در صورتی که حداقل 61 نقطه از توزیع اندازه ذرات خاک در اختیار باشد برای تحلیل‌های مالی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک کافی است در نتیجه برای استفاده از این روش بایستی نسبت تجمعی (یا درصد تجمعی) ذرات خاک در 61 اندازه مختلف در اختیار باشد.

در این مطالعه نسبت تجمعی ذرات خاک با استفاده از روش هیدرومتر در 22 نقطه تعیین شد در حالی که برای بررسی طیف مالی فرکتالی اندازه ذرات خاک لازم است که نسبت تجمعی ذرات در 61 اندازه متفاوت در اختیار باشد. لذا برای بدست آوردن داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک در نقاط فاقد اندازه‌گیری در ابتدا مدل توزیع اندازه ذرات فردلانند (معادله 2) (فردلانند و همکاران، 2000) بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد و پس از تعیین پارامترهای مدل در هر خاک، نسبت تجمعی اندازه ذرات خاک در 61 نقطه بدست آمد.

$$F(x) = \frac{1}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{ap}{x} \right) \right] \right\}^{mp}} \left\{ 1 - \left[\frac{\ln(1 + \frac{Rp}{x})}{(1 + \frac{Rp}{0.001})} \right]^7 \right\}$$

که $F(x)$ نسبت تجمعی ذرات خاک، x اندازه ذرات خاک و a_p ، m_p ، n_p ، R_p پارامترهای مدل می‌باشد. برای تعیین نسبت تجمعی در این نقاط (در 61 نقطه) در ابتدا فاصله بین بزرگترین و کوچکترین اندازه ذرات خاک (2000 تا 0/1 میکرون) به 61 قسمت تقسیم شد. اندازه ذرات در این 61 نقطه بگونه‌ای تعیین شد که معادله (3) همواره برقرار باشد.

$$f = \log \left(\frac{x_{i+1}}{x_i} \right) \quad i = 1, 2, \dots, 61 \quad (3)$$

به منظور تعیین اندازه ذراتی (x_i) که بایستی نسبت تجمعی ذرات خاک در آن مشخص شود در ابتدا تبدیل زیر بر داده‌های اندازه ذرات خاک انجام شد.

$$\varphi_i = \log \left(\frac{x_i}{x_1} \right) \quad (4)$$

x_1 کوچکترین اندازه ذره خاک می‌باشد.

با توجه به تبدیل صورت گرفته بزرگترین و کوچکترین مقدار φ به ترتیب برابر با 4/26 و 0/26 بدست

¹. Scale

البته این منحنی تحت عنوان مدل جهانی مالتی‌فرکتال² نیز شناخته می‌شود (ای و همکاران 2011، بیسوز و همکاران 2012). سپس آزمون کای اسکور برای مقایسه منحنی $\tau(q)$ و منحنی تک‌فرکتالی، مورد استفاده قرار گرفت. این آزمون نشان دهنده معنی‌دار بودن اختلاف منحنی $\tau(q)$ و خط تک‌فرکتال می‌باشد. معنی‌دار بودن این آزمون نشان دهنده مالتی‌فرکتال بودن توزیع اندازه ذرات خاک در نمونه مورد مطالعه است.

در بسیاری از منابع از تفاوت ابعاد فرکتال در گشتاور صفرم (D_0) و گشتاور دوم (D_2) (یعنی D_0-D_2) برای بررسی درجه مالتی‌فرکتالی³ استفاده می‌شود (ویدال و ازکوز و همکاران، 2013). در صورتی که این شاخص بزرگتر از صفر باشد، نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات خاک مالتی‌فرکتالی است اما اگر این شاخص برابر صفر باشد نشان دهنده رفتار تک‌فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. لذا برای بررسی مالتی‌فرکتال و یا تک‌فرکتال بودن توزیع اندازه خاک‌های مورد مطالعه مقدار این شاخص نیز محاسبه شد. هرچه اختلاف این شاخص از صفر بیشتر باشد نشان دهنده مالتی‌فرکتال بودن قوی⁴ توزیع اندازه ذرات خاک است و در صورتی که این شاخص کوچک و یا نزدیک صفر باشد نشان دهنده مالتی‌فرکتالی ضعیف⁵ توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد (ویدال و ازکوز و همکاران، 2013).

در تحقیق حاضر به منظور انجام برازش رابطه (2) بر داده‌های اندازه‌گیری شده و همچنین محاسبه طیف مالتی‌فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک (معادلات 4 الی 10)، برنامه کامپیوتری در محیط برنامه نویسی MATLAB نوشته شد.

در صورتی که برازش رابطه (2) بر داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک از دقت پایینی برخوردار باشد استفاده از روش ارائه شده در تعیین طیف مالتی‌فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک دارای دقت لازم نمی‌باشد. لذا برای بررسی دقت برازش رابطه (2) بر داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک آماره‌های مجموع مربعات خطا (SSE^6)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^7$) و ضریب

D_q نشان دهنده بعد فرکتال در گشتاور q ام می‌باشد.

ابعاد فرکتال (D_q) بر اساس روابط (8) و (9) و با استفاده از شیب خط رگرسیون بین $\log[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon)^q]$ و $\log(\varepsilon)$ در مقادیر مختلف q بدست می‌آیند.

تحقیقات نشان داده است که گشتاور q ام متغیر اندازه‌گیری و نرمال شده، با اندازه مقیاس (ε) بر اساس رابطه زیر مرتبط هستند (بیسوز و همکاران 2012، ای و همکاران 2011).

$$\mu_i(q, \varepsilon) = \frac{[p_i(\varepsilon)]^q}{\sum_i [p_i(\varepsilon)]^q} \propto (\varepsilon/L)^{\tau(q)} \quad (10)$$

که $\tau(q)$ تحت عنوان توان جرم¹ شناخته می‌شود.

یکی از راه‌های بررسی فرکتال و یا مالتی‌فرکتال بودن توزیع اندازه ذرات، مقایسه منحنی تغییرات توان جرم در گشتاورهای مختلف با خط تک‌فرکتالی شبیه سازی شده، می‌باشد (ای و همکاران 2011). در صورتی که تغییرات $\tau(q)$ در گشتاورهای مختلف خطی باشد، توزیع اندازه ذرات خاک دارای رفتار تک‌فرکتالی است اما اگر این منحنی غیر خطی باشد نشان دهنده مالتی‌فرکتال بودن توزیع اندازه ذرات خاک است.

لذا به منظور بررسی مالتی‌فرکتال بودن توزیع اندازه ذرات خاک، مقادیر $\tau(q)$ برای گشتاورهای مختلف محاسبه شد. محاسبه $\tau(q)$ در گشتاورهای مختلف، بر اساس رابطه (10) و با استفاده از شیب خط رگرسیون بین $\log \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon)$ در برابر $\log(\varepsilon)$ انجام شد.

ارتباط بین $\tau(q)$ و ابعاد فرکتال در هر گشتاوری با استفاده از رابطه زیر توصیف می‌شود (ای و همکاران 2011).

$$\tau(q) = (q - 1)D_q \quad (11)$$

در بررسی تک‌فرکتال و یا مالتی‌فرکتال بودن توزیع اندازه ذرات خاک، لازم است که منحنی $\tau(q)$ با منحنی تک‌فرکتالی شبیه‌سازی شده مقایسه شود. اسکرتز و لاجوی (1987) با استفاده از رابطه (11) مدلی را برای برآورد منحنی تک‌فرکتالی ارائه کردند. در مدل ارائه شده آنها توزیع تک‌فرکتال منحنی $\tau(q)$ در مقادیر مختلف گشتاور با استفاده از معادله خطی زیر برآورد می‌شود.

$$(12)$$

$$\tau(q) = q - 1$$

لذا در مطالعه حاضر معادله (12) برای تعیین $\tau(q)$ در گشتاورهای مختلف برای توزیع تک‌فرکتالی استفاده شد.

² Universal multifractal model

³ Multifractality

⁴ Strong multifractal

⁵ Slightly multifractal

⁶ Sum of square error

⁷ Root mean square error

¹ Mass exponent

معنی‌داری (در سطح 1%) بین میانگین درصد ذرات سیلت در عمق 0-5 و 5-15 سانتی‌متری خاک‌های دارای پوسته وجود ندارد. مشابه همین شرایط در خاک‌های بدون پوسته نیز مشاهده شد. همچنین اختلاف معنی‌داری (در سطح 1%) در میانگین درصد شن در عمق 0-5 سانتی-متری خاک‌های دارا و بدون پوسته نیز مشاهده نشد. مقدار ماده آلی در عمق 0-5 سانتی‌متری (3/07 درصد) نسبت به عمق 5-15 سانتی‌متری (2/65 درصد) خاک‌های دارای پوسته بیشتر بود که تفاوت آنها در سطح 1 درصد معنی‌دار می‌باشد. اما اختلاف معنی‌داری در مقدار ماده آلی دو عمق 0-5 سانتی‌متری (1/58 درصد) و 5-15 سانتی‌متری (1/52 درصد) خاک‌های بدون پوسته مشاهده نشد. چامیزو و همکاران، (2012) بیان داشتند که پوسته‌های زیستی قادر به تثبیت کربن اتمسفری هستند. از طرف دیگر افزایش نفوذپذیری در تیمار پوسته‌های زیستی و افزایش رطوبت خاک سبب تشدید فعالیت میکروبی و در نتیجه تثبیت بیشتر کربن و نیتروژن توسط ریز جانداران پوسته‌های زیستی می‌شود که منجر به افزایش زیتوده پوسته‌های زیستی و ماده آلی خاک می‌شود که در خاکدانه‌سازی مشارکت نموده و با افزایش پایداری، حفظ رطوبت و ماده آلی بیش از پیش افزایش می‌یابد (چامیزو و همکاران، 2012). همچنین پوسته‌های زیستی باعث ارتقای پوشش گیاهان می‌شوند که افزودن بقایای این گیاهان به خاک می‌تواند دلیل بر افزایش کربن آلی خاک باشند (بلنپ و همکاران، 2001).

تیین (r^2) با استفاده از معادلات زیر مورد استفاده قرار گرفت.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2 \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n (F_i O_i) \right) - \left(\sum_{i=1}^n F_i \right) \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (F_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n F_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (O_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right]}}$$

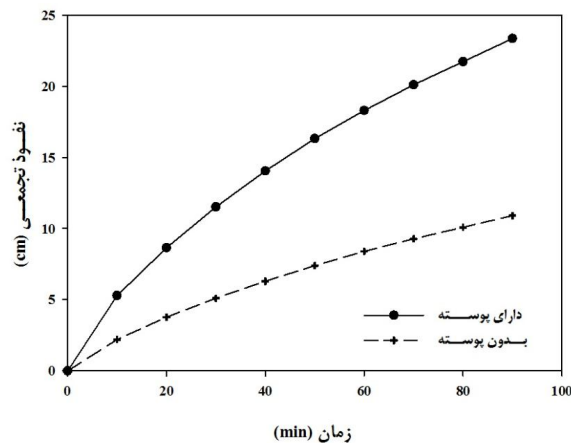
که در این معادلات r ضریب همبستگی، F_i مقدار برآورد شده نسبت تجمعی ذرات خاک، O_i مقدار اندازه‌گیری شده نسبت تجمعی ذرات خاک و n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده منحنی توزیع اندازه ذرات می‌باشد.

نتایج و بحث

تأثیر پوسته‌های زیستی بر خصوصیات خاک

جدول (1) میانگین، حداکثر و حداقل رس، سیلت، شن و ماده آلی تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. میانگین درصد رس عمق 0-5 سانتی‌متر خاک‌های دارای پوسته زیستی برابر با 10/93 و در خاک‌های بدون پوسته برابر با 22/21 می‌باشد. نفوذپذیری بیشتر در پوسته‌های زیستی نسبت به سطوح فاقد پوسته می‌تواند علت آبشویی و انتقال رس از سطح به اعماق پایین‌تر باشد (شکل 1). میانگین درصد رس در عمق 5-15 سانتی‌متری خاک‌های دارای پوسته‌های زیستی برابر با 15/89 درصد می‌باشد که نسبت به عمق 0-5 سانتی‌متری 5 درصد بیشتر می‌باشد. این نتایج نیز نشان دهنده انتقال رس از سطح به لایه‌های پایین‌تر خاک‌های دارای پوسته می‌باشد. میانگین درصد رس در عمق 0-5 سانتی‌متری خاک‌های بدون پوسته برابر با 22/21 و در عمق 5-15 سانتی‌متری برابر با 23/43 می‌باشد. لذا نتایج نشان می‌دهد که انتقال رس از لایه‌های سطحی به اعماق پایین‌تر خاک در خاک‌های بدون پوسته بسیار اندک می‌باشد. اما توزیع عمودی ذرات سیلت در خاک‌های دارای پوسته متفاوت بود. نتایج نشان داد که اختلاف

¹ Coefficient of determination



شکل 1- نفوذ تجمعی آب در خاک در دو تیمار خاک‌های دارا و بدون پوسته (از میانگین داده‌ها برای رسم نمودار استفاده شده است)

جدول 1- حداقل، حداکثر و میانگین برخی از خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه

تیمار	درصد رس			درصد سیلت			درصد شن			درصد ماده آلی			بافت خاک
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	
0-5 سانتی متری خاک‌های پوسته‌دار	2/57	14/54	10/90	55/80	60/16	57/60	37/25	37/25	31/48	1/34	3/36	3/07	لوم سیلتی
5-15 سانتی متری خاک‌های پوسته‌دار	7/36	20/96	15/89	55/76	57/81	56/49	22/52	36/65	27/60	0/81	3/03	2/65	لوم سیلتی
0-5 سانتی متری خاک‌های بدون پوسته	11/23	32/93	22/21	47/77	61/72	54/58	17/40	34/49	23/19	0/67	2/35	1/58	لوم سیلتی - لوم رسی
5-15 سانتی متری خاک‌های بدون پوسته	12/09	31/22	23/43	48/94	55/69	52/58	18/55	32/41	23/97	0/54	2/19	1/51	لوم رسی سیلتی، لوم

مشابه شکل (2) بود. هوانگ و همکاران (2002) دقت و کارایی مدل‌های مختلف توزیع اندازه ذرات خاک را مورد بررسی قرار دادند این محققین نیز بیان داشتند که مدل فردلاند بهترین مدل در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. البته این محققین بیان داشتند که میزان دقت برازش این مدل بر داده‌های تجربی توزیع اندازه ذرات تحت تأثیر نوع کلاس بافتی و مقدار رس خاک می‌باشد و با افزایش رس دقت مدل افزایش می‌یابد. بوچان (1989) بیان داشت که در اغلب خاک‌ها با رس زیاد، توجیه منحنی توزیع اندازه ذرات نیازمند ارائه توابع پیچیده‌ای می‌باشد. لذا با توجه به تعداد زیاد پارامتر (چهار پارامتر) مدل فردلاند (فردلاند و همکاران 2000)، انتظار می‌رود که این مدل دارای دقت زیادی در توجیه منحنی توزیع اندازه ذرات خاک‌هایی با بافت‌های مختلف باشد (هوانگ و همکاران 2002).

بررسی دقت برازش مدل توزیع اندازه ذرات فردلاند بر داده‌های اندازه‌گیری شده

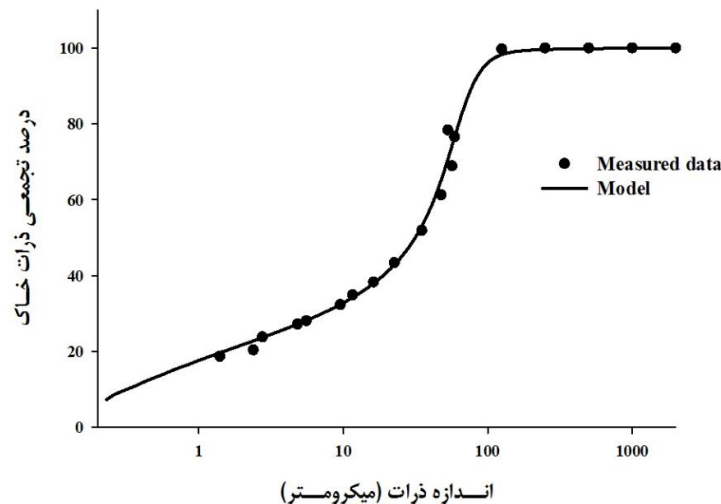
جدول (2) دقت برازش و پارامترهای مدل توزیع اندازه ذرات فردلاند (فردلاند و همکاران 2000) را در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تبیین حاصل از برازش رابطه (2) در خاک‌های مورد مطالعه بین 0/97 الی 0/998 با میانگین 0/992 متغیر بود. میانگین بالای ضریب تبیین حاصل از برازش رابطه (2) بر داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد که این مدل دارای دقت بسیار بالای در توصیف منحنی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. شکل (2) دقت برازش مدل فردلاند را در یک نمونه از خاک‌های مورد مطالعه، نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مدل مذکور در تمامی دامنه اندازه ذرات خاک به خوبی قادر به توصیف توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. نمودار برازش این مدل در دیگر خاک‌ها نیز

جدول 2- آماره‌های توصیف کننده دقت برازش رابطه (2) و پارامترهای این رابطه در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	a_p	n_p	m_p	R_p	SSE	RMSE	r^2	کلاس بافتی خاک
1	0/065	6/079	0/566	$3/19 * 10^2$	0/0036	0/015	0/998	لوم سیلتی
2	0/072	4/338	0/504	$2/61 * 10^2$	0/0095	0/025	0/994	لوم سیلتی
3	0/073	5/200	0/448	$1/43 * 10^2$	0/010	0/026	0/993	لوم سیلتی
4	0/073	4/795	0/424	$2/44 * 10^2$	0/0099	0/025	0/993	لوم سیلتی
5	0/069	4/565	0/985	$0/44 * 10^2$	0/015	0/034	0/993	لوم سیلتی
6	0/076	4/954	0/776	$2/13 * 10^2$	0/023	0/039	0/988	لوم سیلتی
7	0/076	5/734	0/613	$3/33 * 10^2$	0/020	0/036	0/989	لوم سیلتی
8	0/0753	5/906	0/590	$2/48 * 10^2$	0/015	0/032	0/991	لوم سیلتی
9	0/0716	4/235	0/676	$2/59 * 10^2$	0/0072	0/022	0/996	لوم سیلتی
10	0/076	4/406	0/563	$4/06 * 10^2$	0/014	0/031	0/991	لوم سیلتی
11	0/082	5/431	0/476	$0/31 * 10^2$	0/054	0/060	0/970	لوم سیلتی
12	0/074	6/582	0/353	$5/71 * 10^2$	0/0063	0/020	0/995	لوم
13	0/0679	5/295	0/606	$2/50 * 10^2$	0/0053	0/018	0/997	سیلت لوم
14	0/067	5/134	0/528	$0/88 * 10^2$	0/0037	0/015	0/997	سیلت لوم
15	0/070	5/186	0/350	$0/25 * 10^2$	0/0016	0/010	0/998	لوم رسی سیلتی
16	0/067	8/570	0/287	$2/05 * 10^2$	0/0062	0/020	0/994	لوم رسی سیلتی

RMSE، SSE و r^2 به ترتیب مجموع مربعات خطا، میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین حاصل از برازش رابطه (2) بر داده‌های

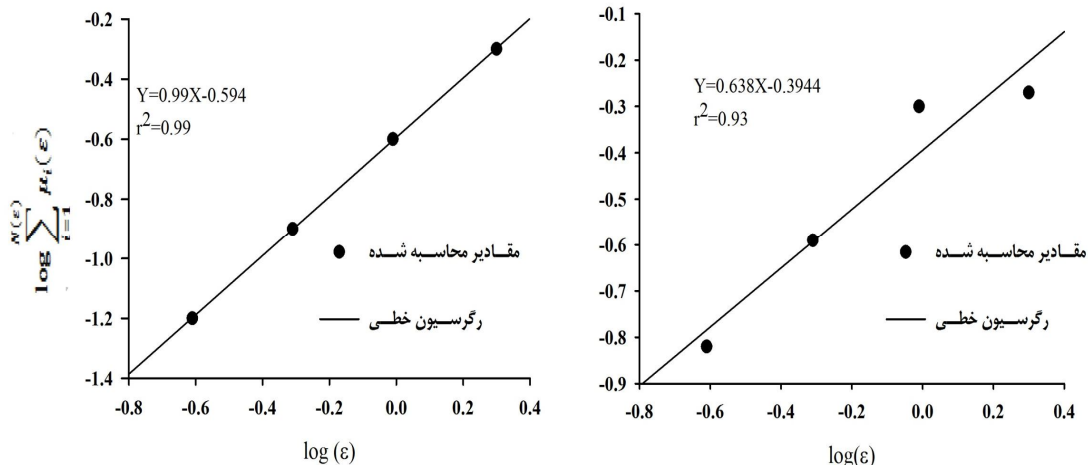
اندازه‌گیری شده توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشند.



شکل 2- برازش مدل توزیع اندازه ذرات فردلاند بر یک نمونه از خاک‌های مورد مطالعه (خاک شماره 1 در جدول 2)

همکاران (2011) می‌باشد. منابع مختلف بیان داشته‌اند که مقدار ضریب تبیین بزرگتر از 0/90 در برآورد ابعاد فرکتال معتبر می‌باشد (پاز - فریر و همکاران 2010). لذا با توجه به اینکه تمامی مقادیر ضرایب تبیین در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه گشتاورهای مورد مطالعه بزرگتر از 0/90 می‌باشد لذا انتخاب گشتاورهای بین مقادیر 10- و 10 سبب ایجاد خطای معنی‌داری در برآورد ابعاد فرکتال نمی‌شود.

بررسی رفتار مالتهی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک ضریب تبیین خط رگرسیون بین $\log(\epsilon)$ و $\log \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)$ در گشتاورهای مختلف بین 0/999 الی 0/93 متغیر بود (شکل 3). نتایج نشان داد که ضرایب تبیین خطوط رگرسیون در گشتاورهای نزدیک و یا برابر با صفر بزرگتر و با افزایش و کاهش گشتاورها، مقادیر ضرایب تبیین کاهش می‌یابند. این نتایج مشابه نتایج بدست آمده توسط ونگ و همکاران (2008) و ای و



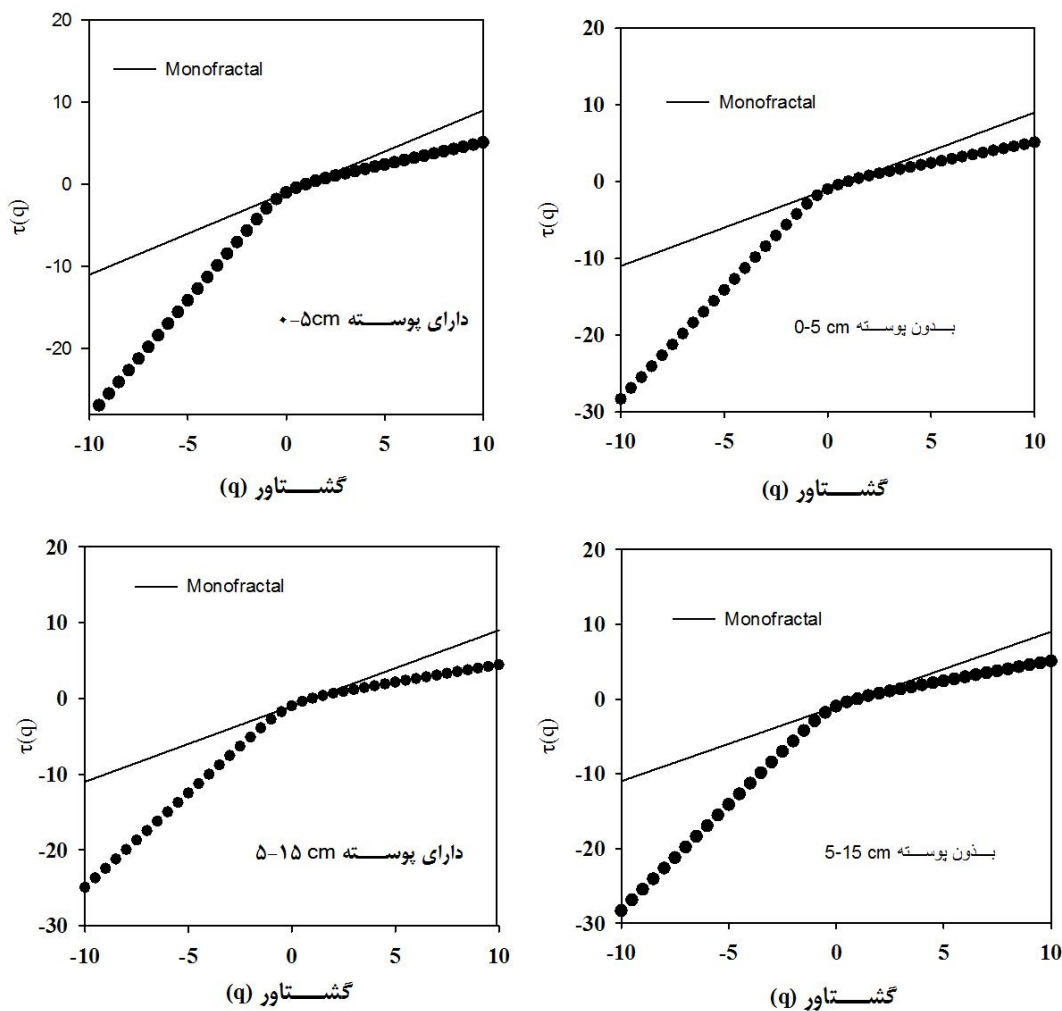
شکل 3- دقت برازش خط رگرسیون بین $\log(\epsilon)$ و $\log \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)$ در تعیین D_q در بیشترین و کم‌ترین دقت در خاک شماره 1 جدول 2

خاک در مکش‌های مختلف شود. نتایج آزمون کای اسکور نیز نشان داد که در تمامی خاک‌های مورد مطالعه توزیع $\tau(q)$ از نظر آماری متفاوت از توزیع تک‌فرکتالی، است. این نتایج مشابه نتایج ای و همکاران (2011) می‌باشد این محققین نیز بیان داشتند که اختلاف معنی داری بین منحنی های $\tau(q)$ و منحنی تک‌فرکتالی وجود دارد.

شیب منحنی‌های $\tau(q)$ در گشتاورهای کوچکتر ($q < 0$) و بزرگتر از صفر ($q > 0$) با یکدیگر متفاوت است (شکل 3) که نشان دهنده چند مقیاسی بودن توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. به عبارت دیگر این نتایج نشان می‌دهد که ابعاد فرکتال متفاوتی برای توصیف منحنی توزیع اندازه ذرات خاک لازم است و بایستی از توان‌های متفاوتی (ابعاد فرکتال) برای توصیف منحنی در قسمت‌هایی با فراوانی بیشتر و کمتر اندازه ذرات خاک استفاده شود. این نتایج مشابه نتایج تیرگرسلطانی و همکاران (1391) می‌باشد. این محققین نیز بیان داشتند که بیش از یک بعد فرکتال برای توصیف منحنی توزیع اندازه ذرات خاک لازم است.

شکل (4) تغییرات منحنی‌های $\tau(q)$ (توان جرم) را در گشتاورهای مختلف و در تیمارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی تیمارها، منحنی‌های $\tau(q)$ از خط راست انحراف داشته و دارای انحنای منفی¹ می‌باشند. به عبارت دیگر شیب منحنی‌های $\tau(q)$ در مقادیر گشتاورها بزرگتر و کوچکتر از صفر با یکدیگر متفاوت است. در صورتی که این منحنی خط راست باشند، نشانه تک‌فرکتالی بودن توزیع اندازه ذرات خاک است اما اگر این منحنی از خط راست انحراف داشته باشند، مالتی فرکتالی بودن توزیع اندازه ذرات خاک را نشان می‌دهد. لذا انحراف منحنی‌های $\tau(q)$ در خاک مورد مطالعه نشان داد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه مالتی فرکتال است و استفاده از یک بعد فرکتال برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک کافی نیست. به عبارت دیگر یک بعد فرکتال قادر به توصیف تمامی دامنه توزیع اندازه ذرات خاک نمی‌باشد. در برخی از مطالعات صورت گرفته در کشور از یک بعد فرکتال برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک استفاده شده است و سپس ارتباط این بعد فرکتال با برخی از خصوصیات خاک از قبیل رطوبت خاک در مکش‌های مختلف بدست آمده است (استواری و بیگی هرچگانی 1392، قنبریان و میلان 2010). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رفتار توزیع اندازه ذرات خاک‌ها مالتی فرکتال می‌باشد بنابراین و استفاده از یک بعد فرکتال برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک کافی نیست. لذا ممکن است که استفاده از برخی شاخص‌های طیف مالتی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک سبب بهبود نتایج برآورد رطوبت

¹ Negative curvature



شکل 4- تغییرات توان جرم محاسبه شده از رابطه (10) در تیمارهای مختلف پوسته‌دار و بدون پوسته در اعماق مختلف خاک و مقایسه آن با خط تک‌فرکتال

بعد فرکتال آن‌تروپی (D_1) شاخصی از ناهمگنی⁵ متغیر اندازه گیری شده می‌باشد. لذا در برخی از مطالعات صورت گرفته از تفاوت ابعاد فرکتال D_0 و D_1 ($D_0 > D_1$) برای بررسی ناهمگنی خصوصیت مورد مطالعه استفاده شده است. هرچه تفاوت ابعاد فرکتال ظرفیت و آن‌تروپی کمتر باشد، نشان دهنده همگن بودن متغیر اندازه‌گیری شده (به عنوان مثال توزیع اندازه ذرات خاک) می‌باشد و در صورتی این تفاوت بیشتر باشد، نشان دهنده ناهمگنی بیشتر توزیع اندازه ذرات خاک است (زلک و سی 2006). زلک و سی (2006) روش مالتی فرکتال را برای توصیف تغییرپذیری مکانی برخی از خصوصیات خاک در یک ترنسکت مورد استفاده قرار دادند. این محققین مقدار D_1 تغییرات رس خاک در روی یک ترنسکت را برابر با 0/97

ابعاد فرکتال در مقادیر q برابر با 0، 1 و 2 به ترتیب ابعاد ظرفیت¹ (D_0)، آن‌تروپی² (D_1) و همبستگی³ (D_2) نامیده می‌شوند (ویدال وازکوز و همکاران 2013، بیسواز و همکاران 2012). مقادیر برابر این ابعاد ($D_0 = D_1 = D_2$) نشان دهنده رفتار تک‌فرکتالی⁴ توزیع اندازه ذرات خاک‌ها می‌باشد. اما در صورتی که این ابعاد برابر نباشند نشان دهنده مالتی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک است و در سیستم‌های مالتی فرکتال بطور کلی رابطه $D_0 < D_1 < D_2$ برقرار است (بیسواز و همکاران 2012).

1. Capacity dimension

2. Entropy dimension

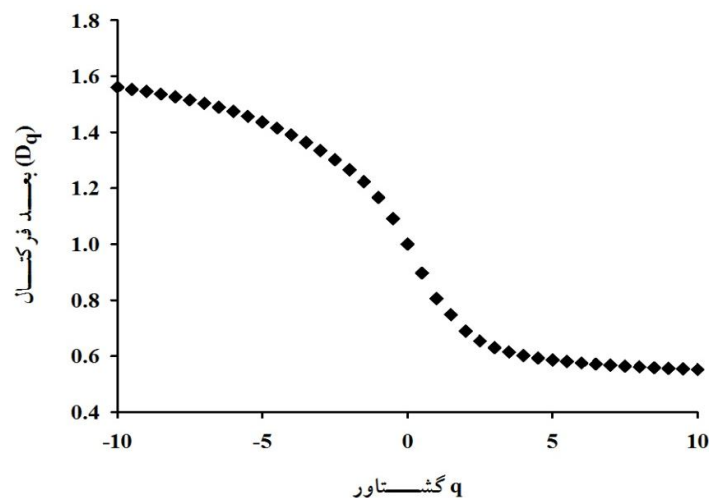
3. Correlation

4. Monofractal

5. Heterogeneity

شکل (5) طیف مالتی فرکتال یک نمونه از خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که تغییرات ابعاد فرکتال در مقادیر متفاوت q به صورت یک تابع سیگموئیدی می‌باشد. پس‌داس و همکاران (2001)، مترو (2005) و ونگ و همکاران (2008) نیز نشان دادند که روند طیف مالتی فرکتالی به صورت یک تابع سیگموئیدی می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که ابعاد فرکتال D_0 ، D_1 و D_2 با هم برابر نمی‌باشد و اختلاف معنی‌داری بین این ابعاد مشاهده شد (جدول 3). به عبارت دیگر این نتایج نشان دادند که توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه دارای رفتار مالتی فرکتالی است. نتایج حاصل از آنالیز ابعاد فرکتال با نتایج منحنی‌های $\tau(q)$ (توان جرم) همخوانی داشته و یکدیگر را تأیید می‌کنند.

بدست آورند که اختلاف 0/03 واحدی را با D_0 نشان داد. آنها همین تفاوت اندک را دلیل بر ناهمگن بودن توزیع رس در یک ترنسکت نسبت به برخی از خصوصیات که D_1 برابر با 1 داشتند، دانستند. این محققین بیان داشتند که هرچه تفاوت این ابعاد فرکتال بیشتر باشد ناهمگنی متغیر اندازه‌گیری شده نیز بیشتر خواهد بود. در این مطالعه حداقل و حداکثر تفاوت ابعاد فرکتال در گشتاور صفرم و یکم (D_0-D_1) به ترتیب برابر 0/12 و 0/23 بود. که این تفاوت نشان دهنده ناهمگنی زیاد توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. ای و همکاران (2011) در بررسی توزیع اندازه ذرات 12 خاک حداکثر و حداقل این شاخص را (D_0-D_1) به ترتیب برابر با 0/03 و 0/19 بدست آوردند.



شکل 5- طیف مالتی فرکتال در یک نمونه از خاک‌های مورد مطالعه (خاک شماره 1 در جدول 2)

متوسط شاخص D_0-D_2 در تیمارهای مورد مطالعه بین 0/240 الی 0/295 متغیر بود. اگرچه در منابع عدد مشخصی برای تعیین مرز مالتی فرکتال بودن قوی و یا ضعیف توزیع اندازه ذرات خاک گزارش نشده اما برخی از آنها مقادیر 0/20 این شاخص را به عنوان مالتی فرکتال بودن قوی متغیر مورد بررسی در نظر گرفته‌اند (ویدال وازکوز و همکاران، 2013). لذا مقادیر بدست آمده شاخص D_0-D_2 نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه دارای رفتار مالتی فرکتالی قوی می‌باشند. در این مطالعه همبستگی معنی‌داری بین ابعاد فرکتال $D_{0.5}$ (بعد فرکتال در $q=0.5$)، D_1 (بعد فرکتال در $q=1$)، $D_{1.5}$ (بعد فرکتال در $q=1.5$) و D_2 (بعد فرکتال در $q=2$) با خصوصیات فیزیکی خاک مشاهده شد. همبستگی بین تمامی ابعاد با درصد شن منفی و معنی‌دار بود در حالی که همبستگی بین این ابعاد و درصد رس مثبت و معنی‌دار بود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد رس و با کاهش درصد شن بعد فرکتال افزایش می‌یابد (جدول 4). این نتایج مشابه نتایج مترو (2005) می‌باشد. ونگ و همکاران (2008) نیز نشان دادند که با افزایش رس بعد فرکتال در گشتاور یکم (D_1) افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه D_1 شاخصی از ناهمگنی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد، می‌توان بیان کرد که با افزایش درصد رس خاک ناهمگنی توزیع اندازه ذرات خاک افزایش می‌یابد.

مطالعه بین 0/240 الی 0/295 متغیر بود. اگرچه در منابع عدد مشخصی برای تعیین مرز مالتی فرکتال بودن قوی و یا ضعیف توزیع اندازه ذرات خاک گزارش نشده اما برخی از آنها مقادیر 0/20 این شاخص را به عنوان مالتی فرکتال بودن قوی متغیر مورد بررسی در نظر گرفته‌اند (ویدال وازکوز و همکاران، 2013). لذا مقادیر بدست آمده شاخص D_0-D_2 نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه دارای رفتار مالتی فرکتالی قوی می‌باشند.

در این مطالعه همبستگی معنی‌داری بین ابعاد فرکتال $D_{0.5}$ (بعد فرکتال در $q=0.5$)، D_1 (بعد فرکتال در $q=1$)، $D_{1.5}$ (بعد فرکتال در $q=1.5$) و D_2 (بعد فرکتال در $q=2$) با خصوصیات فیزیکی خاک مشاهده شد. همبستگی بین تمامی ابعاد با درصد رس منفی و معنی‌دار بود در حالی که همبستگی بین این ابعاد و درصد رس مثبت و معنی‌دار بود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد رس و با کاهش درصد شن بعد فرکتال افزایش می‌یابد. این نتایج مشابه نتایج مترو (2005) می‌باشد. ونگ و همکاران (2008) نیز نشان دادند که با افزایش رس بعد فرکتال در گشتاور یکم (D_1) افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه D_1 شاخصی از ناهمگنی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد، می‌توان بیان کرد که با افزایش درصد رس خاک ناهمگنی توزیع اندازه ذرات خاک افزایش می‌یابد.

توزیع اندازه ذرات خاک همبستگی خطی قوی را با بافت خاک (یعنی درصد شن و رس و سیلت) دارند. درصد شن، سیلت و رس خاک بر بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکها مؤثر است بنابراین ابعاد فرکتال می‌تواند شاخص‌های مناسبی برای توصیف تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک باشد. به عنوان مثال ونگ و همکاران (2008) نشان دادند که ابعاد فرکتال شاخص‌های مناسبی برای بررسی تغییر کاربری اراضی می‌باشند.

همبستگی بین فرسایش پذیری خاک (K) و ابعاد فرکتال منفی می‌باشد بنابراین می‌توان انتظار داشت که با افزایش ابعاد فرکتال (یعنی $D_{0.5}$ ، D_1 ، $D_{1.5}$ ، D_2 و $D_{2.5}$) فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد (جدول 4). با توجه به این که افزایش ابعاد فرکتال سبب افزایش ذرات ریز و کاهش ذرات درشت می‌شود، بنابراین افزایش ابعاد فرکتال نشان دهنده افزایش ذرات مقاوم به فرسایش می‌باشد و در نتیجه کاهش فرسایش پذیری خاک می‌شود. نتایج نشان داد که ابعاد فرکتال بدست آمده از منحنی

جدول 3- متوسط کمترین و بیشترین مقادیر ابعاد فرکتالی در خاک‌های مورد مطالعه

ابعاد فرکتال	$D_{0.5}$	D_1	$D_{1.5}$	D_2	$D_{2.5}$
بیشترین مقدار	0/93	0/89	0/88	0/82	0/78
کمترین مقدار	0/87	0/77	0/72	0/68	0/64
متوسط ابعاد فرکتال	0/91 ^a	0/84 ^b	0/80 ^b	0/74 ^c	0/70 ^c

حروف متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین ابعاد فرکتالی در هر ردیف می‌باشد.

جدول 4- همبستگی بین ابعاد فرکتال با برخی از خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

خصوصیت	$D_{0.5}$	D_1	$D_{1.5}$	D_2	$D_{2.5}$
فرسایش پذیری خاک (K)	-0/80 ^{**}	-0/87 ^{**}	-0/90 ^{**}	-0/87 ^{**}	-0/84 ^{**}
درصد شن	-0/80 ^{**}	-0/82 ^{**}	-0/82 ^{**}	-0/81 ^{**}	-0/72 ^{**}
درصد رس	0/78 ^{**}	0/86 ^{**}	0/87 ^{**}	0/82 ^{**}	0/76 ^{**}
درصد سیلت	-0/36 ^{ns}	-0/47 ^{ns}	-0/49 [*]	-0/42 ^{ns}	-0/42 ^{ns}

^{**} نشان دهنده معنی‌داری در سطح 1 درصد و ^{ns} نشان دهنده غیر معنی‌دار همبستگی‌ها می‌باشد.

متری خاک‌های دارا و بدون پوسته وجود ندارد. به عبارت دیگر توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارا و بدون پوسته تقریباً بر هم منطبق می‌باشند.

در این مطالعه بیشترین متوسط شاخص D_0-D_2 در توزیع اندازه ذرات خاک‌های سطحی دارای پوسته (0/295) و کمترین متوسط این شاخص در توزیع اندازه ذرات لایه 5-15 سانتی‌متری خاک‌های بدون پوسته زیستی (0/240) بدست آمد. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارای پوسته به نسبت خاک‌های بدون پوسته دارای درجه بالاتری از مالیتی فرکتالی می‌باشند. نتایج نشان داد که شاخص D_0-D_2 در خاک‌های عمق 0-5 سانتی‌متری تیمار دارای پوسته زیستی با دیگر تیمارها در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار می‌باشد. اما مقدار این شاخص در دیگر تیمارها و عمق‌ها اختلاف معنی‌داری را با یکدیگر نشان نمی‌دهند. همچنین متوسط شاخص D_0-D_1 که درجه ناهمگنی توزیع اندازه ذرات خاک را نشان می‌دهد در تیمارهای مورد مطالعه بین 0/195 الی 0/147 متغیر بود. بیشترین مقدار متوسط این

تأثیر پوسته‌های زیستی بر توزیع اندازه ذرات خاک و ابعاد فرکتالی

جدول (5) تغییرات ابعاد فرکتال را در خاک‌های دارا و بدون پوسته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین ابعاد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک، در تیمارهای دارا و بدون پوسته مشاهده نشد گرچه نتایج نشان داد که ابعاد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک‌ها در عمق 0-5 سانتی‌متری خاک‌های دارای پوسته در مقایسه با خاک‌های بدون پوسته کوچکتر می‌باشد. با توجه به همبستگی مثبت بین رس و ابعاد فرکتالی و همبستگی منفی بین شن و این ابعاد می‌توان بیان داشت که درصد رس در خاک‌های دارای پوسته در مقایسه با خاک‌های بدون پوسته کمتر و مقدار شن در این خاک‌ها بیشتر است. دلیل کاهش رس در خاک‌های دارای پوسته به نفوذپذیری بالاتر این خاک‌ها مربوط می‌شود. نفوذپذیری بالاتر این خاک‌ها سبب می‌شود که رس از سطح خاک شسته شده و به اعماق پایین‌تر منتقل شود. نتایج نشان می‌دهند که از نظر عددی تفاوتی بین ابعاد فرکتال در عمق 5-15 سانتی-

همچنین نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین بعد فرکتال به ترتیب در گشتاورهای 10- و گشتاور 10+ بدست آمد. اختلاف بین ابعاد فرکتال در این گشتاورها (گشتاور 10- و 10+) نیز شاخصی از درجه فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد (ویدال وازکوز و همکاران 2013). در این مطالعه بیشترین مقدار این شاخص در عمق 0-5 سانتیمتری توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارای پوسته می‌باشد (شکل 6) که نشان دهنده ناهمگنی بیشتر توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارای پوسته می‌باشد.

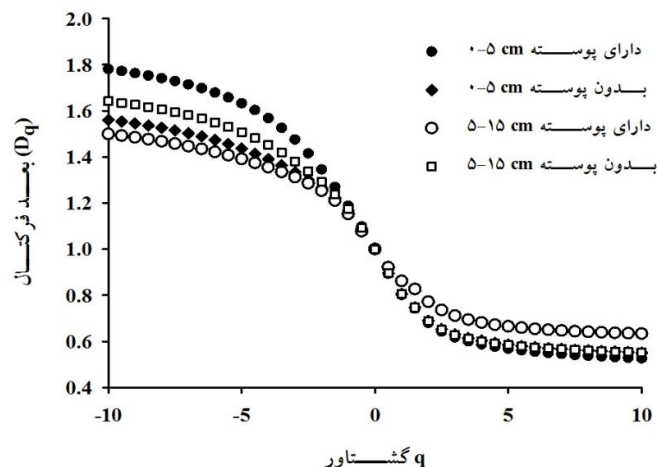
شاخص در توزیع اندازه ذرات خاک‌های عمق 0-5 سانتیمتری دارای پوسته مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارای پوسته به نسبت خاک‌های بدون پوسته دارای ناهمگنی بیشتری می‌باشند.

شکل (6) طیف مالتی فرکتال توزیع اندازه ذرات تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل مذکور نشان می‌دهد که روند سیگموئیدی طیف مالتی فرکتالی در تمامی تیمارهای مورد مطالعه مشاهده می‌شود. شکل (6)

جدول 5- متوسط ابعاد فرکتال توزیع اندازه ذرات در خاک‌های پوسته‌دار و بدون پوسته

تیمار	D _{0.5}	D ₁	D _{1.5}	D ₂	D _{2.5}	D _{0-D₂}	D _{0-D₁}
دارای پوسته عمق 0-5 سانتی متری	0/892 ^b	0/807 ^b	0/755 ^a	0/705 ^a	0/670 ^a	0/295 ^a	0/195
بدون پوسته عمق 0-5 سانتی متری	0/917 ^b	0/852 ^b	0/817 ^a	0/760 ^a	0/715 ^a	0/241 ^b	0/147
دارای پوسته عمق 5-15 سانتی متری	0/915 ^b	0/852 ^b	0/815 ^a	0/757 ^a	0/722 ^a	0/242 ^b	0/147
بدون پوسته عمق 5-15 سانتی متری	0/915 ^b	0/855 ^b	0/822 ^a	0/757 ^a	0/715 ^a	0/240 ^b	0/145

حروف متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی‌دار میانگین‌ها در سطح احتمال 5 درصد در هر ستون می‌باشد.



شکل 6- نمونه طیف مالتی فرکتال در تیمارهای مختلف پوسته‌دار و بدون پوسته در اعماق مختلف خاک

نشان داد که توزیع اندازه ذرات خاک دارای رفتار مالتی فرکتالی است لذا با استفاده از یک توان ثابت (یک بعد فرکتال) نمی‌توان توزیع اندازه ذرات خاک را توصیف کرد. در این مطالعه همبستگی منفی و معنی‌دار بین ابعاد فرکتالی D_{0.5}، D₁ و D₂ با درصد شن مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که همبستگی بین درصد رس و ابعاد فرکتالی مذکور مثبت و معنی‌دار است. همبستگی بین ابعاد فرکتالی D_{0.5}، D₁ و D₂ و فرسایش پذیری خاک منفی و در سطح احتمال 1 درصد معنی‌دار بود. بنابراین این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد فرکتال ذرات مقاوم به فرسایش یعنی درصد رس خاک افزایش یافته اما

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار مالتی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک‌های و تأثیر پوسته-های زیستی بر ابعاد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک انجام شد. بر این اساس در این مطالعه رفتار مالتی فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارا و بدون پوسته مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات ابعاد فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک در مقادیر مختلف گشتاور (q) دارای روند سیگموئیدی می‌باشد. مقایسه منحنی‌های $\tau(q)$ و خط تک فرکتالی شبیه‌سازی شده نیز

فرایند آبشویی، درصد رس در دو عمق 0-5 و 5-15 سانتی‌متر تحت پوشش پوسته زیستی کمتر است اما تفاوت معنی‌داری ندارند و بافت خاک در هر دو تیمار لوم سیلتی تا لوم رسی سیلتی است. از طرف دیگر پوسته‌های زیستی با ترشح پلی‌ساکاریدها و سایر مواد باعث افزایش میزان ماده آلی خاک می‌شود به طوری که در هر دو عمق دو عمق 0-5 و 5-15 سانتی‌متر نسبت به تیمار بدون پوسته به طور معنی‌داری ماده آلی بیشتر است.

ذرات حساس به فرسایش از قبیل شن خیلی ریز کاهش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار شاخص D_0-D_2 در توزیع اندازه ذرات خاک‌های عمق 0-5 سانتیمتری تیمار دارای پوسته مشاهده شد که نشان دهنده ناهمگنی بیشتر توزیع اندازه ذرات خاک‌های دارای پوسته می‌باشد. البته نتایج نشان داد توزیع اندازه ذرات خاک‌ها در تمامی تیمارهای مورد مطالعه دارای رفتار مالتی فرکتالی قوی می‌باشند. پوسته‌های زیستی نسبت به خاک بدون پوشش پوسته تأثیر معنی‌داری بر توزیع ذرات اولیه رس، سیلت و شن ندارد، اگر چه به موجب افزایش نفوذپذیری و طی

فهرست منابع:

1. استواری، ی. و ح.ا. بیگی هرچگانی. 1392. پیشنهاد توابع انتقالی تخمین رطوبت خاک بر اساس بعد فرکتال بافت خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 27(3): 641-630.
2. تیرگرسلطانی، م.ت، ع.ا. ذوالفقاری، م. گرجی و م. شرفا. 1391. بررسی محدودیت‌های کاربردی توابع توانی در توصیف توزیع اندازه ذرات اولیه خاک. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). 26(1): 76-67.
3. طویلی، ع. (1383). بررسی تأثیر برخی گونه‌های خز و گل‌سنگ بر خصوصیات خاک و گیاهان مرتعی (مطالعه موردی مراتع قره‌قیر استان گلستان). رساله دکتری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
4. Belnap, J. 2006. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrol Process*. 20(15): 3159-3178.
5. Belnap, J., and D. A. Gillette. 1998. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *JAE*. 39: 133-142.
6. Belnap, J., Kaltenecker, J.H., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S., Eldridge, D. 2001. Biological soil crusts: ecology and management. United States Department of the Interior Bureau of Land Management, National Science and Technology Center.
7. Biswas, A., H.P. Cresswell and B. Si. 2012. Application of multifractal and joint multifractal analysis in examining soil spatial variation: A review. In: *Fractal Analysis and Chaos in Geosciences*. In TechOpen. pp. 109-138.
8. Buchan, G.D. 1989. Applicability of the simple lognormal model to particle-size distribution in soils. *Soil Sci*. 147:155-161.
9. Chamizo, S., Y. Cantón, I. Miralles, and F. Domingo. 2012. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil Biol Biochem*. 49: 96-105.
10. Fang, H. Y., Q. G. Cai, H. Chen, and Y. Q. Li. 2007. Mechanism of formation of physical soil crust in desert soils treated with straw checkerboards. *Soil Tillage Res*. 93(1): 222-230.
11. Filgueira, R.R., Y.A. Pachepsky, and L.L. Fournier. 2003. Time-mass scaling in soil texture analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 67:1703-1706.
12. Fredlund, M.D., D.G. Fredlund, and G.W. Wilson. 2000. An equation to represent grain-size distribution. *Can. Geotech. J*. 37: 817-827.
13. Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, In: Klute, A., et al. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part1, Physical and mineralogical methods, seconded*. ASA, Inc., Madison, WI, pp. 383-411.

14. Ghanbarian-Alavijeh., B. and H. Millán. 2009. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma*. 151: 224–23.
15. Hwang, I.I.S., P.L. Kwang, S.L. Dong, and S.E. Powers. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*66: 1143–1150.
16. Montero, E. 2005. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions. *Ecol. Model.* 108: 305–315.
17. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. in: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, ASA, Inc., Madison, WI, pp. 961-1010.
18. Paz-Ferrero, J., E. Vidal-Vazquez, and G.V. J. Miranda. 2010. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters. *Geoderma*. 160: 47-56.
19. Posadas, A., D. Gimenez, M. Bittelli, C.M.P. Vaz, and M. Flury. 2001. Multifractal characterization of soil particle-size distributions. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 65: 1361–1367.
20. Reynolds, W.D., D.E. Elrick and E.G. Youngs. 1986. Single-Ring and Double-or Concentric-ring Infiltrimeters. in: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*. ASA, Inc., Madison, WI, pp.363-375.
21. Schertzer, D. and Lovejoy, S. 1987. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative process. *J. Geophys. Res.* 92: 9693–9714.
22. Vidal-Vazquez, E., O.A. Camargo, S.R. Viera, J.G.V. Miranda, J.R.F. Menk, G.M. Siqueira, J.M. Miras-Avolas, and A. Pas Gonzeles. 2013. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. *V Z J.* 12(3).doi: 10.2136/vzj2012.0188.
23. Wang, D., B. Fu, W. Fhao, H. Hu, and Y. Wang. 2008. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China. *Catena*. 72: 29-36.
24. Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26: 189–193.
25. Yi, L., L. Min, and R. Horton. 2011. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions. *Pedosphere*. 21(1): 75–83, 2011.
26. Zeleke, T.B., and B. Si. 2006. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. *Geoderma*. 134: 440–452.

